

В настоящем справочнике приведены материалы по инженерному расчету и проектированию элементов волноводных трактов сверхвысоких частот; дан расчет систем, имеющих оптимальную частотную характеристику.

Для проектирования основных типов передающих линий и фидерных устройств (фильтров, ступенчатых и плавных переходов, мостов, направленных ответвителей и др.) рассчитаны таблицы, применение которых сводит процедуру расчета к элементарным операциям. Методы расчета иллюстрированы числовыми примерами.

Во втором издании расширены сведения: по теории четырехполюсников и восьмиполюсников, полосковым линиям, фильтрам, ступенчатым переходам, направленным ответвителям.

Справочник предназначен для широкого круга научных работников, инженеров и техников, работающих в области волноводной техники в промышленности, научно-исследовательских организациях и учебных заведениях.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие ко второму изданию 7

Глава первая

Четырехполюсники

1.1. Некоторые сведения из матричной алгебры	9
1.2. Исходные определения	11
1.3. Нормирование матриц	13
1.4. Изменение направления передачи	14
1.5. Соединения четырехполюсников	14
1.6. Входное сопротивление и входной коэффициент отражения четырехполюсника	16
1.7. Обратимые (взаимные) четырехполюсники	17
1.8. Реактивные четырехполюсники	18
1.9. Симметричные и антиметричные четырехполюсники	19
1.10. Связь между элементами различных матриц	19
1.11. Физический смысл элементов матриц	23
1.12. Характеристические параметры четырехполюсника	25
1.13. Рабочие параметры четырехполюсника	27
1.14. Схемы замещения обратимых четырехполюсников	29
1.15. Минимальное число параметров, определяющее четырехполюсник	30
1.16. Параметры некоторых простейших четырехполюсников	32
1.17. Некоторые свойства полиномов Чебышева	38
1.18. Цепочки четырехполюсников. Неоднородные линии	41
Литература	48

Глава вторая

Сведения из теории восьмиполюсников

2.1. Определения	49
2.2. Нормирование матриц	52
2.3. Соединения восьмиполюсников	54
2.4. Обратимые (взаимные) восьмиполюсники	55
2.5. Реактивность восьмиполюсников	55
2.6. Симметричные восьмиполюсники	56
2.7. Направленные восьмиполюсники	56
2.8. Структура матриц идеально направленного, реактивного и полностью симметричного восьмиполюсника	58
2.9. Связь между элементами различных матриц	58

2.10. Анализ симметричных восьмиполюсников методом синфазного и противофазного возбуждения	60
2.11. Некоторые соотношения между клеточными матрицами	61
2.12. Матрицы некоторых простейших восьмиполюсников	62
2.13. Волновые сопротивления для четного и нечетного видов колебаний в связанных линиях	71
2.14. Четырехполюсники, производные от восьмиполюсников	72
2.15. Цепочки восьмиполюсников. Связанные неоднородные линии	87
Литература	91

Глава третья

Передающие линии

3.1. Волновые сопротивления	92
3.2. Постоянная затухания	92
3.3. Электрическая прочность	100
3.4. Стандарты прямоугольных волноводов	103
3.5. Передача мощности в однородной передающей линии при несогласованных нагрузках	122
3.6. Структура полей в линиях передачи	124
3.7. П- и Н-волноводы	150
3.8. Статистические характеристики коэффициента отражения на входе длинного тракта	160
3.9. Волноводный многополюсник	164
Литература	168

Глава четвертая

Простейшие элементы СВЧ тракта

4.1. Разъемы передающих линий	171
4.2. Диэлектрические шайбы	177
4.3. Изгибы волноводного тракта	180
4.4. Изгибы коаксиального тракта	183
4.5. Диафрагмы в прямоугольном волноводе	183
4.6. Скачок волновых сопротивлений в передающей линии	200
4.7. Формулы для расчета параметров простейших резонаторов	208
Литература	212

Глава пятая

Полосковые линии передачи

5.1. Основные типы	214
5.2. Ограничения на размеры	217
5.3. Волновое сопротивление	217
5.4. Затухание и добротность	225
5.5. Предельная мощность полосковой линии	230
5.6. Связанные полосковые линии	231
5.7. Емкость связанных полосковых линий, состоящих из двух одинаковых прямоугольных полосок	265
Литература	268

Глава шестая

Ступенчатые переходы

6.1. Определения и обозначения	270
6.2. Чебышевские переходы	273
6.3. Переходы с максимально плоской частотной характеристикой	276
6.4. Приближенная теория	288
6.5. Таблицы для расчета ступенчатых переходов с $R=1 \div 30$	357
6.6. Таблицы для расчета ступенчатых переходов с очень большим перепадом волнового сопротивления ($R=10 \div 10^6$)	358
6.7. Коррекция длины ступенек в связи с учетом паразитной емкости скачков волнового сопротивления	362
6.8. Примеры	364
6.9. Ступенчатый переход между двумя прямоугольными волноводами с произвольными сечениями	368
6.10. Расчет ступенчатых переходов между двумя прямоугольными волноводами одинаковой высоты и разной ширины (Н-плоскость)	374
Литература	377

Глава седьмая

Плавные переходы

7.1. Общие сведения	378
7.2. Экспоненциальный плавный переход	379
7.3. Чебышевский плавный переход	380
7.4. Компенсированный экспоненциальный переход	387
7.5. Предельный переход с максимально плоской характеристикой (вероятностный плавный переход)	391
7.6. Примеры	392
7.7. Сравнение ступенчатых и плавных переходов	394
Литература	396

Глава восьмая

Фильтры с четвертьволновыми связями

8.1. Исходные сведения	398
8.2. Схема синтеза прототипа	401
8.3. Техника расчетов прототипа	404
8.4. Реализация полосно-пропускающего фильтра (ППФ)	410
8.5. Фазо-частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров	414
8.6. Расчет полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ) с четвертьволновыми связями	425
Литература	438

Глава девятая

Полосно-пропускающие фильтры СВЧ с непосредственными связями

9.1. Исходные сведения	439
9.2. Ступенчатый переход как прототип фильтра с непосредственными связями	439

9.3. Фильтр на индуктивных проводимостях	850
9.4. Ступенчатый фильтр	511
9.5. Фильтр на связанных полосковых линиях	513
9.6. Расчет фильтров с непосредственными связями, основанный на использовании низкочастотных прототипных схем	514
Литература	552

Глава десятая

Фильтры на связанных линиях

10.1. Исходные сведения	553
10.2. Звено полосно-пропускающего фильтра (ППФ) на связанных линиях	553
10.3. Резонатор полосно-пропускающего фильтра на связанных линиях	556
10.4. Полосно-пропускающий фильтр с четвертьвольновыми связями	559
10.5. Резонатор полосно-заграждающего фильтра на связанных линиях	561
10.6. Полосно-заграждающий фильтр из одинаковых резонаторов	563
10.7. Полосно-заграждающий фильтр с четвертьвольновыми связями и оптимальными частотными характеристиками	566
10.8. Полосно-пропускающий фильтр с непосредственными связями	567
10.9. Расчет фильтров на связанных линиях, основанный на использовании низкочастотных прототипных схем	571
Литература	579

Глава одиннадцатая

Мосты, направленные фильтры и ответвители, многоканальные системы

11.1. Определения	580
11.2. Волноводные щелевые мосты	580
11.3. Волноводный мост со многими отверстиями связи в узкой стенке	583
11.4. Многошлейфовый квадратный мост	585
11.5. Волноводные направленные ответвители с полной связью	588
11.6. Направленные ответвители и мосты на связанных симметрических линиях	590
11.7. Многоэлементные направленные ответвители со слабой связью	597
11.8. Эффективная направленность. Примеры	604
11.9. Широкополосные кольцевые делители мощности	608
11.10. Параметры элементов связи между прямоугольными волноводами	610
11.11. Многоканальные системы на мостах и фильтрах	626
11.12. Многоканальные системы из направленных фильтров	631
Литература	651

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За последние годы резко возросли уровень и объем требований, предъявляемых к частотным характеристикам устройств, в которых используется диапазон сверхвысоких частот (радиорелейные линии, радиолокаторы, радиотелескопы и др.). Соответственно росту требований усложнился тракт, направляющий энергию от генератора СВЧ колебаний к нагрузке; в настоящее время направляющая система, помимо собственно фидера (волновода, коаксиальной линии и т. п.), включает большое число различных фидерных устройств: фильтрующих, согласующих, ответвляющих, суммирующих и др. Частотные характеристики указанных устройств должны удовлетворять жестким требованиям; соответствующий этим требованиям расчет систем называют синтезом.

Для цепей с сосредоточенными постоянными методы синтеза развиваются уже около 50 лет и достигли определенной завершенности. Методика синтеза устройств диапазона СВЧ еще находится в процессе становления, однако достигнутые здесь за последние годы результаты уже позволяют говорить о том, что техника фидерных устройств в значительной мере сформировалась в отдельную область со своими специфическими методами и приемами, стоящими на границе теории цепей и электродинамики.

В данной работе систематизирован ряд справочных материалов по синтезу различных классов фидерных устройств: фильтров, согласователей, направленных ответвителей и мостов. С целью единообразного и экономного изложения материала авторы пользуются следующей методикой:

1. Синтез узлов ведется по их рабочим параметрам (рабочему затуханию); отобраны оптимальные варианты, основанные в большинстве случаев на чебышевских или максимально плоских характеристиках рабочего затухания.

2. В основу расчетов положен аппарат волновых матриц четырехполюсников и восьмиполюсников, соответствующий специфике процессов в СВЧ цепях. Поскольку в литературе систематизированные справочные материалы по волновым матрицам отсутствуют, авторы считали необходимым дать общие сведения по этому вопросу в объеме, достаточном для самостоятельного решения задач.

3. При подготовке материалов авторами проведено табулирование большого числа многих типовых задач. Оно дает возможность избежать случайные ошибки при единичных расчетах и сводит к минимуму трудоемкость инженерных расчетов.

При работе над справочником учитывались две возможности его использования. С одной стороны, в справочнике дается подробная методика числовых расчетов с использованием таблиц и, следовательно, он может использоваться инженерами и техниками для решения практических задач. С другой стороны, в нем сжато излагается ряд справочных материалов, относящихся к общим вопросам синтеза узлов СВЧ. Эти материалы предназначены для инженеров и научных работников, занимающихся решением новых задач и исследовательской работой.

Авторы не ставили задачи подбора всей существующей библиографии по каждому разделу; приводятся лишь те литературные источники, которые непосредственно относятся к излагаемому материалу.

Во втором издании справочника полностью переработаны главы 1 и 2, относящиеся к общей теории четырехполюсников и восьмиполюсников, а также частично — глава 6 (ступенчатые переходы) и глава 8 (фильтры с четвертьволновыми связями). Переработки, подвергались также главы 3 и 4, в которых описываются передающие линии и элементы СВЧ тракта.

Добавлены главы 5, 9, 10, в которых трактуются вопросы проектирования полосковых линий, фильтров с непосредственными связями и фильтров на связанных полосковых линиях.

Главы 1, 2 написаны совместно А. Л. Фельдштейном и Л. Р. Явичем.

Главы 3, 4, 5 написаны В. П. Смирновым, параграф 3.6 — В. П. Смирновым совместно с Б. М. Машковцевым, а параграф 3.9 — Б. М. Машковцевым.

Глава 6 написана Л. Р. Явичем совместно с В. П. Смирновым.

Главы 7, 8, 9, 10, 11 написаны А. Л. Фельдштейном, параграфы 7.3; 9.6 и 10.9 — Л. Р. Явичем, а параграф 11.12 — Б. М. Машковцевым и Г. А. Афанасьевой.

Труд по подготовке рукописи к печати взял на себя В. П. Смирнов.

Авторы благодарны за помощь в работе Р. И. Перецу, М. С. Грудцину, Е. С. Жаворонковой, А. В. Ивакиной, А. И. Исакову, Ф. У. Керстенецкой, О. И. Мазеповой, В. Н. Макушину, Р. Д. Петровой, Н. И. Прохоровой, Е. В. Соловьевой, Р. М. Шакировой.

Кроме того, авторы благодарны всем читателям, приславшим свои замечания и пожелания по первому изданию.

Замечания по второму изданию авторы просят направлять по адресу: Москва, Главный почтамт, п/я 693, издательство «Советское радио».

55
2

ГЛАВА ПЕРВАЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ

1.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТРИЧНОЙ АЛГЕБРЫ

Матрицей называют совокупность величин, расположенных в виде прямоугольной таблицы из m строк и n столбцов. Если $m = n$, то матрица называется квадратной порядка m . В отличие от определителя матрица не может быть вычислена; она представляет собой таблицу коэффициентов — в общем случае комплексных.

Равными называют матрицы одного и того же порядка, соответствующие элементы которых равны друг другу, т. е. $[a] = [b]$, если

$$a_{kl} = b_{kl}. \quad (1.1)$$

Суммой матриц $[a]$ и $[b]$ называют матрицу

$$[c] = [a] + [b], \quad (1.2)$$

у которой

$$c_{kl} = a_{kl} + b_{kl}. \quad (1.3)$$

Сложение (вычитание) матриц подчиняется переместительному (коммутативному) закону

$$[a] + [b] = [b] + [a]$$

и сочетательному (ассоциативному) закону

$$[a] + ([b] + [c]) = ([a] + [b]) + [c].$$

Умножение матрицы на скалярный множитель k означает умножение на k каждого элемента матрицы.

Умножение двух квадратных матриц одинакового порядка производится по правилу «строка на столбец»

$$[a] \{ b \} = [c], \quad (1.4)$$

где

$$c_{kl} = \sum_{s=1}^n a_{ks} b_{sl}. \quad (1.5)$$

Так, например, для квадратной матрицы второго порядка

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Умножение матриц, в общем случае, не подчиняется переместительному закону

$$[a][b] \neq [b][a],$$

т. е. следует различать умножение матрицы $[a]$ на матрицу $[b]$ справа и слева.

Для произведения матриц верны сочетательный и распределительный законы:

$$\left. \begin{array}{l} [a]([b][c]) = ([a][b])[c] = [a][b][c], \\ ([a] + [b])[c] = [a][c] + [b][c], \\ [a]([b] + [c]) = [a][b] + [a][c]. \end{array} \right\} \quad (1.7)$$

Умножение квадратной матрицы на матрицу-строку ($m = 1$) или матрицу-столбец ($n = 1$) можно проводить согласно (1.6), если дополнить нулями матрицу-строку (матрицу-столбец) до квадратной матрицы. В матричной алгебре не существует понятия дроби $\frac{[b]}{[a]}$; вместо него применяется умножение матрицы $[b]$ на матрицу $[a]^{-1}$ слева, либо справа. Здесь $[a]^{-1}$ — матрица, обратная матрице $[a]$.

Для квадратной матрицы второго порядка

$$[a]^{-1} = \frac{1}{\det[a]} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

где $\det[a] = |a| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, определитель матрицы $[a]$, (т. е. определитель, составленный из элементов матрицы $[a]$).

Возведение в произвольную степень « k » квадратной матрицы второго порядка определяется выражением

$$[a]^k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^k = \\ = (V|a|)^k \begin{bmatrix} T_k(a) + \frac{a_{11} - a_{22}}{2V|a|} U_{k-1}(a) & \frac{a_{12}}{\sqrt{|a|}} U_{k-1}(a) \\ \frac{a_{21}}{\sqrt{|a|}} U_{k-1}(a) & T_k(a) - \frac{a_{11} - a_{22}}{2V|a|} U_{k-1}(a) \end{bmatrix}, \quad (1.9)$$

где

$$\alpha = \frac{a_{11} + a_{22}}{2\sqrt{|a|}};$$

$T_k(a)$ и $U_{k-1}(a)$ — полиномы Чебышева первого и второго рода соответственно; развернутые их выражения приведены в конце главы в табл. 1.1 и 1.2.

Можно использовать также тригонометрическую форму записи полиномов Чебышева

$$T_k(a) = \cos(k \arccos \alpha); \quad (1.10)$$

$$U_{k-1}(a) = \frac{\sin((k-1) \arccos \alpha)}{\sin(\arccos \alpha)}. \quad (1.11)$$

Транспонированной матрицей $[a]_t$ называется матрица, строками которой служат столбцы матрицы $[a]$. Таким образом, если общий элемент матрицы $[a]$ имеет вид a_{ki} , то в транспонированной матрице $[a]_t$ он приобретает вид a_{ik} . Например:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix}. \quad (1.12)$$

Единичной матрицей называют матрицу вида

$$[1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.13)$$

1.2. ИСХОДНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Четырехполюсником называется электрическое устройство, имеющее две пары зажимов (полюсов), одна из которых служит для подключения системы к источнику энергии (генератору), а другая — к потребителю энергии (нагрузке). Зажимы, к которым присоединен генератор, называются входными, а зажимы, к которым присоединена нагрузка, — выходными зажимами четырехполюсника.

Пассивными называются четырехполюсники, в которых энергия поступает только через входные зажимы¹⁾.

Линейными называются четырехполюсники, в которых токи и напряжения²⁾ на зажимах связаны линейной зависимостью.

Получили распространение следующие виды записи этой зависимости [2, 3]:

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = a_{11}U_2 + a_{12}I_2, \\ I_1 = a_{21}U_2 + a_{22}I_2; \end{array} \right\} \quad (1.14)$$

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2, \\ U_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2; \end{array} \right\} \quad (1.15)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2, \\ I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2; \end{array} \right\} \quad (1.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{1\text{пад}} = t_{11}U_{2\text{пад}} + t_{12}U_{2\text{отр}}, \\ U_{1\text{отр}} = t_{21}U_{2\text{пад}} + t_{22}U_{2\text{отр}}; \end{array} \right\} \quad (1.17)$$

1) По терминологии работы [2] речь идет о так называемых неавтономных четырехполюсниках.

2) Имеются в виду как полные напряжения, так и их составляющие — падающие и отраженные волны.

$$\begin{aligned} U_{1\text{отр}} &= s_{11} U_{1\text{пад}} + s_{12} U_{2\text{отр}}, \\ U_{2\text{пад}} &= s_{21} U_{1\text{пад}} + s_{22} U_{2\text{отр}}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Здесь U_1 , U_2 , I_1 , I_2 — напряжения и токи на входе и выходе четырехполюсника (рис. 1.1) $U_{1\text{пад}}$, $U_{2\text{пад}}$, $U_{1\text{отр}}$, $U_{2\text{отр}}$ — падающие и отраженные волны напряжения в передающих линиях на входе и выходе четырехполюсника (рис. 1.2), причем

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{1\text{пад}} + U_{1\text{отр}}, \\ I_1 &= \frac{1}{\rho_1} (U_{1\text{пад}} - U_{1\text{отр}}); \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_{2\text{пад}} + U_{2\text{отр}}, \\ I_2 &= \frac{1}{\rho_2} (U_{2\text{пад}} - U_{2\text{отр}}). \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$



Рис. 1.1. Направление токов и напряжений в четырехполюснике при прямой передаче.

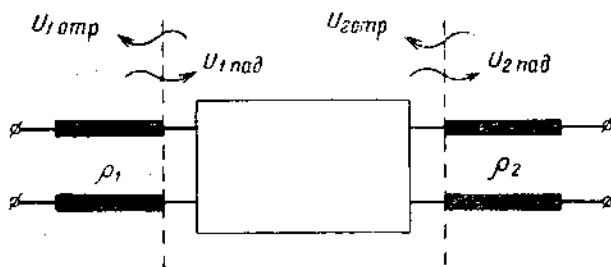


Рис. 1.2. Падающие и отраженные волны на входе и выходе четырехполюсника.

Коэффициенты уравнений (1.14) — (1.18) могут быть записаны в виде следующих ненормированных матриц:

$$\text{матрица передачи } [a] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.21)$$

$$\text{матрица сопротивлений } [z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.22)$$

$$\text{матрица проводимостей } [y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.23)$$

$$\text{волновая матрица передачи } [t] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.24)$$

$$\text{волновая матрица рассеяния } [s] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}. \quad (1.25)$$

Матрицы $[t]$ и $[s]$ описывают четырехполюсник, включенный между передающими линиями с волновыми сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 (рис. 1.2) либо четырехполюсник, включенный между активными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Четырехполюсник, включенный между активными сопротивлениями.

1.3. НОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦ

Выполняя в уравнениях (1.14) — (1.18) тождественные преобразования, можно заменять напряжения и токи нормированными напряжениями и токами,

$$\left. \begin{aligned} U_1^H &= \frac{U_1}{\sqrt{\rho_1}}; & U_2^H &= \frac{U_2}{\sqrt{\rho_2}}; & I_1^H &= I_1 \sqrt{\rho_1}; & I_2^H &= I_2 \sqrt{\rho_2}, \\ U_{1\text{пад}}^H &= \frac{U_{1\text{пад}}}{\sqrt{\rho_1}}; & U_{1\text{отр}}^H &= \frac{U_{1\text{отр}}}{\sqrt{\rho_1}}; & U_{2\text{пад}}^H &= \frac{U_{2\text{пад}}}{\sqrt{\rho_2}}, \\ U_{2\text{отр}}^H &= \frac{U_{2\text{отр}}}{\sqrt{\rho_2}}, \end{aligned} \right\} \quad (1.26)$$

имеющими размерность $[\text{вт}]^{1/2}$ (или корня из мощности); все элементы матриц становятся при этом безразмерными. Соотношения между нормированными и ненормированными матрицами даны в § 1.10. Нормированные матрицы обозначаются прописными буквами алфавита, ненормированные — строчными (подробнее см. [3]).

1.4. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ

Уравнения (1.14) — (1.18) и рис. 1.1 описывают передачу энергии слева направо. При обратном направлении передачи (рис. 1.4),



Рис. 1.4. Направление токов и напряжений в четырехполюснике при обратной передаче.

матрицы четырехполюсников изменяются. Ниже дана связь между нормированными матрицами при прямом и обратном (знак «штрих») направлениях передачи:

$$\begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} A_{22} & A_{12} \\ A_{21} & A_{11} \end{bmatrix}; \quad (1.27)$$

$$\begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{22} & -Z_{21} \\ -Z_{12} & -Z_{11} \end{bmatrix}; \quad (1.28)$$

$$\begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} \\ Y'_{21} & Y'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{22} & -Y_{21} \\ -Y_{12} & -Y_{11} \end{bmatrix}; \quad (1.29)$$

$$\begin{bmatrix} T'_{11} & T'_{12} \\ T'_{21} & T'_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{|T|} \begin{bmatrix} T_{11} & -T_{21} \\ -T_{12} & T_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.30)$$

$$\begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} \\ S'_{21} & S'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{22} & S_{21} \\ S_{12} & S_{11} \end{bmatrix}; \quad (1.31)$$

где

$$|A| = A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}; \quad (1.32)$$

$$|T| = T_{11} T_{22} - T_{12} T_{21}. \quad (1.33)$$

Для ненормированных матриц вид этих связей полностью сохраняется.

1.5. СОЕДИНЕНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

При каскадном (цепочечном) включении четырехполюсников (рис. 1.5) их передаточные матрицы ($[a]$, $[A]$, $[t]$, $[T]$) перемножаются.

Например:

$$[a] = \prod_{i=1}^k [a]_i; \quad [T] = \prod_{i=1}^k [T]_i, \quad (1.34)$$

где k — число четырехполюсников в цепочке.

При параллельном соединении четырехполюсников (рис. 1.6) их матрицы проводимости складываются

$$[y] = \sum_{i=1}^k [y]_i. \quad (1.35)$$

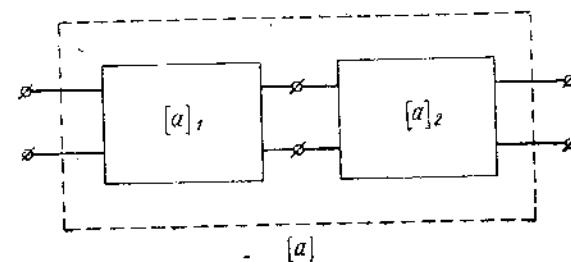


Рис. 1.5. Каскадное соединение четырехполюсников.

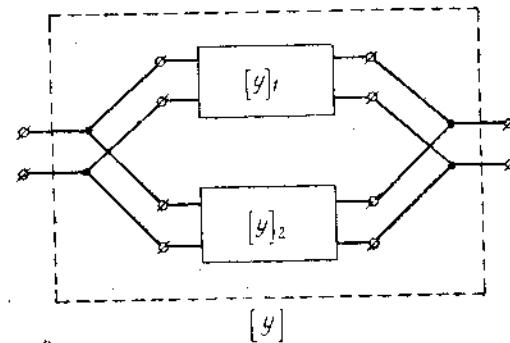


Рис. 1.6. Параллельное соединение четырехполюсников.

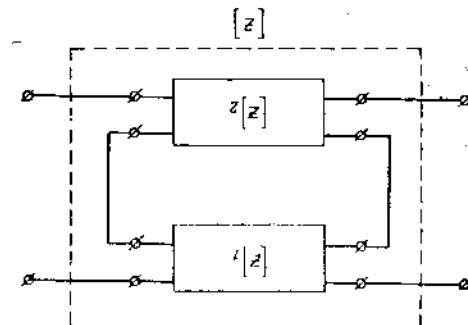


Рис. 1.7. Последовательное соединение четырехполюсников.

При последовательном соединении четырехполюсников (рис. 1.7) их матрицы сопротивления складываются

$$[z] = \sum_{i=1}^k [z]_i. \quad (1.36)$$

Формулы (1.35) и (1.36) справедливы при определенных ограничениях (см. [2, 4]).

1.6. ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ВХОДНОЙ КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Входное сопротивление $z_{\text{вх}}$ четырехполюсника определяется как отношение напряжения к току на входных зажимах. При прямом направлении передачи имеем

$$z_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{a_{11} z_n + a_{12}}{a_{21} z_n + a_{22}}, \quad (1.37)$$

где $z_n = \frac{U_2}{I_2}$ — сопротивление нагрузки.

При обратном направлении передачи

$$z'_{\text{вх}} = \frac{U'_1}{I'_1} = \frac{a_{22} z'_n + a_{12}}{a_{21} z'_n + a_{11}}, \quad (1.38)$$

где $z'_n = \frac{U'_2}{I'_2}$ — сопротивление нагрузки при обратном направлении передачи.

В случае $z'_n \rightarrow \infty$ (холостой ход) либо $z_n = 0$ (короткое замыкание) из (1.37) и (1.38) следует

$$z_{\text{вх}} = \frac{a_{11}}{a_{21}}; \quad z_{\text{вх}}' = \frac{a_{12}}{a_{22}}; \quad z'_{\text{вх}} = \frac{a_{22}}{a_{21}}; \quad z'_{\text{вх}}' = \frac{a_{12}}{a_{11}}. \quad (1.39)$$

Из последних выражений следует

$$\frac{z_{\text{вх}}}{z'_{\text{вх}}} = \frac{z_{\text{вх}}'}{z'_{\text{вх}}'} = \frac{a_{11}}{a_{22}}, \quad (1.40)$$

$$z_{\text{вх}} z'_{\text{вх}} = z_{\text{вх}}' z'_{\text{вх}} = \frac{a_{12}}{a_{21}}. \quad (1.41)$$

Входной коэффициент отражения $\Gamma_{\text{вх}}$ в передающей линии на входе четырехполюсника определяется как отношение отраженной волны в этой линии к падающей.

При прямом направлении передачи

$$\Gamma_{\text{вх}} = \frac{T_{21} + T_{22} \Gamma_n}{T_{11} + T_{12} \Gamma_n}, \quad (1.42)$$

где Γ_n — коэффициент отражения от нагрузки в выходной линии.

При обратном направлении передачи

$$\Gamma'_{\text{вх}} = \frac{-T_{12} + T_{22} \Gamma'_n}{T_{11} - T_{21} \Gamma'_n},$$

где Γ_n — коэффициент отражения в выходной линии при обратном направлении передачи.

Через элементы матрицы $[S]$ коэффициенты отражения выражаются следующим образом:

$$\Gamma_{\text{вх}} = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_n}{1 - S_{22} \Gamma_n} \quad (1.43)$$

и

$$\Gamma'_{\text{вх}} = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma'_n}{1 - S_{11} \Gamma'_n}. \quad (1.44)$$

1.7. ОБРАТИМЫЕ [ВЗАЙМНЫЕ] ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ

Среди пассивных линейных четырехполюсников различают две основные группы — обратимые и необратимые четырехполюсники.

Обратимые четырехполюсники подчиняются принципу взаимности: если э. д. с., находящаяся в какой-либо цепи, вызывает ток определенной силы в другой цепи, то та же э. д. с., помещенная во вторую цепь, вызовет в первой цепи ток той же силы, что и в первом случае [2, 5].

Из этого принципа вытекают следующие связи между элементами матриц:

$$\det [a] = 1; \quad \det [A] = 1; \quad (1.45)$$

$$z_{21} = -z_{12}; \quad Z_{21} = -Z_{12}; \quad (1.46)$$

$$y_{21} = -y_{12}; \quad Y_{21} = -Y_{12}; \quad (1.47)$$

$$\det [t] = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad \det [T] = 1; \quad (1.48)$$

$$\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} s_{12} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} s_{21}; \quad S_{12} = S_{21}. \quad (1.49)$$

Необратимый четырехполюсник можно представить в виде каскадного соединения обратимой и необратимой частей.

Действительно, если $[a]$ — матрица необратимого четырехполюсника, то ее можно записать в виде

$$[a] = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sqrt{|a|}} & \frac{a_{12}}{\sqrt{|a|}} \\ \frac{a_{21}}{\sqrt{|a|}} & \frac{a_{22}}{\sqrt{|a|}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sqrt{|a|} & 0 \\ 0 & \sqrt{|a|} \end{bmatrix}, \quad (1.50)$$

что можно доказать непосредственным умножением. Первый матричный множитель в (1.50) описывает обратимый четырехполюсник (определитель первой матрицы равен $\frac{a_{11}}{\sqrt{|a|}} \frac{a_{22}}{\sqrt{|a|}} - \frac{a_{12}}{\sqrt{|a|}} \times \frac{a_{21}}{\sqrt{|a|}} = 1$), а второй сомножитель — необратимый (определитель

матрицы равен $V|\alpha| \sqrt{|\alpha|} \neq 1$ по условию). Элемент цепи, соответствующий второму сомножителю, называют идеальным преобразователем мощности [6]; он не влияет на входное сопротивление системы и полностью определяет ее вентильные свойства.

1.8. РЕАКТИВНЫЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ

Реактивными называются четырехполюсники, в которых диссипативные потери энергии пренебрежимо малы. Реактивным может быть как обратимый, так и необратимый четырехполюсник.

Матрица рассеяния реактивного четырехполюсника унитарна, т. е. подчиняется условию [3]

$$[S][\bar{S}]_t = [1], \quad (1.51)$$

откуда

$$\begin{aligned} |S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 &= 1, \\ |S_{21}|^2 + |S_{22}|^2 &= 1, \end{aligned} \quad (1.52)$$

$$S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22} = 0.$$

Из (1.52) следует

$$|S_{11}| = |S_{22}|, \quad (1.53)$$

$$|S_{12}| = |S_{21}|, \quad (1.54)$$

т. е. в реактивном четырехполюснике КБВ и рабочее затухание не зависят от направления передачи. Невзаимность реактивного четырехполюсника может проявляться лишь в неравенстве фаз

$$\arg S_{12} \neq \arg S_{21}.$$

Матрицы $[S]$ и $[T]$, удовлетворяющие условиям (1.52), имеют вид

$$[S] = \begin{bmatrix} |S_{11}| e^{j\varphi_{11}} & \sqrt{1 - |S_{11}|^2} e^{j\varphi_{12}} \\ \sqrt{1 - |S_{11}|^2} e^{j\varphi_{21}} & |S_{11}| e^{j(\varphi_{12} + \varphi_{21} - \varphi_{11} + \pi)} \end{bmatrix}; \quad (1.55)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}} e^{-j\varphi_{21}} & \frac{|S_{11}|}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}} e^{-j(\varphi_{11} - \varphi_{21})} \\ \frac{|S_{11}|}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}} e^{j(\varphi_{11} - \varphi_{21})} & \frac{1}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}} e^{j\varphi_{12}} \end{bmatrix}. \quad (1.56)$$

В случае обратимого ($\varphi_{12} = \varphi_{21}$) реактивного четырехполюсника из (1.56) следует

$$T_{11} = T_{22}^*, \quad T_{12} = T_{21}^*, \quad (1.57)$$

а также a_{11}, a_{22} — действительны,

a_{12}, a_{21} — мнимы.

Из (1.57) и (1.48) имеем

$$|T_{11}|^2 = 1 + |T_{21}|^2 = 1 + |T_{12}|^2. \quad (1.58)$$

а из (1.56)

$$|T_{11}|^2 = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2}; \quad |S_{11}|^2 = \frac{|T_{11}|^2 - 1}{|T_{11}|^2}. \quad (1.59)$$

1.9. СИММЕТРИЧНЫЕ И АНТИМЕТРИЧНЫЕ¹ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ

Понятия симметрии и антиметрии вводятся для группы обратимых четырехполюсников.

В симметричном четырехполюснике сопротивления² холостого хода (короткого замыкания) при передаче в прямом и обратном направлениях равны друг другу³.

Отсюда следует

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= a_{22}; & z_{11} &= -z_{22}; & y_{11} &= -y_{22}, \\ t_{12} &= -t_{21}; & s_{11} &= s_{22}; & A_{11} &= A_{22}, \\ Z_{11} &= -Z_{22}; & Y_{11} &= -Y_{22}; & T_{12} &= -T_{21}, \\ S_{11} &= S_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (1.60)$$

В антиметричном четырехполюснике нормированное сопротивление в режиме холостого хода при прямом (обратном) направлениях передачи равно нормированной проводимости в режиме короткого замыкания при обратном (прямом) направлении передачи.

Отсюда следует:

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_{12}}{\sqrt{p_1 p_2}} &= a_{21} \sqrt{p_1 p_2}; & \frac{z_{11}}{p_1} &= y_{22} p_2, \\ \frac{z_{22}}{p_2} &= y_{11} p_1; & A_{12} &= A_{21}, \\ Z_{11} &= Y_{22}; & Z_{22} &= Y_{11}, \\ t_{12} &= t_{21}; & s_{11} &= -s_{22}, \\ T_{12} &= T_{21}; & S_{11} &= -S_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (1.61)$$

1.10. СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ РАЗЛИЧНЫХ МАТРИЦ

1. Связь между нормированными матрицами в волновой теории:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{S_{21}} & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & -\frac{|S|}{S_{21}} \end{bmatrix}; \quad (1.62)$$

¹ Антиметричный четырехполюсник является частным случаем несимметричного (или асимметричного) четырехполюсника. Подробнее см. [3, 15]. Применяемая иногда терминология антисимметричный вместо антиметричный неточна.

² Нормированное либо ненормированное (в симметричной системе $p_1 = p_2$).

³ Другие определения симметрии см. [2, 3].

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & \frac{|T|}{T_{11}} \\ \frac{1}{T_{11}} & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix}, \quad (1.63)$$

где

$$|T| = T_{11} T_{22} - T_{12} T_{21} = \frac{S_{21}}{S_{21}} = \frac{p_2}{p_1} \quad |t| = |a|, \quad (1.64)$$

$$|S| = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21} = -\frac{T_{22}}{T_{11}}. \quad (1.65)$$

2. Связь между нормированными матрицами в классической теории:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{11}}{Z_{21}} & -\frac{|Z|}{Z_{21}} \\ \frac{1}{Z_{21}} & -\frac{Z_{22}}{Z_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_{22}}{Y_{21}} & \frac{1}{Y_{21}} \\ -\frac{|Y|}{Y_{21}} & \frac{y_{11}}{Y_{21}} \end{bmatrix}; \quad (1.66)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{A_{21}} & -\frac{|A|}{A_{21}} \\ \frac{1}{A_{21}} & -\frac{A_{22}}{A_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{22}}{|Y|} & -\frac{Y_{12}}{|Y|} \\ -\frac{Y_{21}}{|Y|} & \frac{Y_{11}}{|Y|} \end{bmatrix}; \quad (1.67)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{22}}{|Z|} & -\frac{Z_{12}}{|Z|} \\ -\frac{Z_{21}}{|Z|} & \frac{Z_{11}}{|Z|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{22}}{A_{12}} & -\frac{|A|}{A_{12}} \\ \frac{1}{A_{12}} & -\frac{A_{11}}{A_{12}} \end{bmatrix}, \quad (1.68)$$

где

$$\left. \begin{aligned} |Y| &= Y_{11} Y_{22} - Y_{12} Y_{21} = \frac{-A_{21}}{A_{12}} = |y| p_1 p_2, \\ |Z| &= Z_{11} Z_{22} - Z_{12} Z_{21} = -\frac{A_{12}}{A_{21}} = \frac{|z|}{p_1 p_2}, \\ |A| &= A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21} = -\frac{Z_{12}}{Z_{21}} = |a|. \end{aligned} \right\} \quad (1.69)$$

3. Связь между нормированными и ненормированными матрицами одного и того же типа:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} & \frac{a_{12}}{\sqrt{p_1 p_2}} \\ a_{21} \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} & a_{22} \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \end{bmatrix}; \quad (1.70)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} & A_{12} \sqrt{\frac{p_1 p_2}{p_1}} \\ \frac{A_{21}}{\sqrt{p_1 p_2}} & A_{22} \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \end{bmatrix}; \quad (1.71)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{p_1} & \frac{z_{12}}{\sqrt{p_1 p_2}} \\ \frac{z_{21}}{\sqrt{p_1 p_2}} & \frac{z_{22}}{p_2} \end{bmatrix}; \quad (1.72)$$

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} p_1 & Z_{12} \sqrt{p_1 p_2} \\ Z_{21} \sqrt{p_1 p_2} & Z_{22} p_2 \end{bmatrix}; \quad (1.73)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11}}{p_1} & y_{12} \sqrt{p_1 p_2} \\ y_{21} \sqrt{p_1 p_2} & y_{22} p_2 \end{bmatrix}; \quad (1.74)$$

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{11}}{p_1} & \frac{Y_{12}}{\sqrt{p_1 p_2}} \\ \frac{Y_{21}}{\sqrt{p_1 p_2}} & \frac{Y_{22}}{p_2} \end{bmatrix}; \quad (1.75)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.76)$$

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.77)$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} s_{12} \\ \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.78)$$

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} s_{12} \\ \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}. \quad (1.79)$$

4. Связь между нормированными матрицами волновой и классической теории

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{11} + A_{12} + A_{21} + A_{22} & A_{11} - A_{12} + A_{21} - A_{22} \\ A_{11} + A_{12} - A_{21} - A_{22} & A_{11} - A_{12} - A_{21} + A_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.80)$$

$$[T] = \frac{1}{2Z_{21}} \begin{bmatrix} Z_{12} Z_{21} - (Z_{11} + 1)(Z_{22} - 1) & (Z_{11} + 1)(Z_{22} + 1) - Z_{12} Z_{21} \\ Z_{12} Z_{21} - (Z_{11} - 1)(Z_{22} - 1) & (Z_{11} - 1)(Z_{22} + 1) - Z_{12} Z_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.81)$$

$$[T] = \frac{1}{2Y_{21}} \begin{bmatrix} (1+Y_{11})(1-Y_{22}) + Y_{12}Y_{21} & -(1+Y_{11})(1+Y_{22}) + Y_{12}Y_{21} \\ -(1-Y_{11})(1-Y_{22}) - Y_{12}Y_{21} & -(1-Y_{11})(1+Y_{22}) - Y_{12}Y_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.82)$$

$$[S] = \frac{1}{|A| - (A_{11} + A_{21})(A_{21} + A_{22})} \times \begin{bmatrix} 1 & -2|A|A_{21} \\ |A| - (A_{11} - A_{21})(A_{22} + A_{21}) & |A| - (A_{22} - A_{21})(A_{11} + A_{21}) \end{bmatrix}; \quad (1.83)$$

$$[S] = \frac{1}{(Z_{11} + 1)(Z_{22} - 1) - Z_{12}Z_{21}} \times \begin{bmatrix} 1 & 2Z_{12} \\ (Z_{11} - 1)(Z_{22} - 1) - Z_{12}Z_{21} & (Z_{22} + 1)(Z_{11} + 1) - Z_{12}Z_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.84)$$

$$[S] = \frac{1}{(1+Y_{11})(1-Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}} \times \begin{bmatrix} 1 & -2Y_{12} \\ (1-Y_{11})(1-Y_{22}) - Y_{12}Y_{21} & (1+Y_{11})(1+Y_{22}) - Y_{12}Y_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.85)$$

$$[A] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T'_{11} + T_{21} + T_{12} + T_{22} & T_{11} + T_{21} - T_{12} - T_{22} \\ T'_{11} - T_{21} + T_{12} - T_{22} & T_{11} - T_{21} - T_{12} + T_{22} \end{bmatrix}; \quad (1.86)$$

$$[Z] = \frac{1}{T_{21} - T_{11} + T_{22} - T_{12}} \times \begin{bmatrix} -(T_{11} + T_{21} + T_{12} + T_{22}) & 2|T| \\ -2 & T_{22} - T_{12} + T_{11} - T_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.87)$$

$$[Y] = \frac{1}{T_{11} + T_{21} - T_{12} - T_{22}} \times \begin{bmatrix} 1 & -2|T| \\ T_{11} - T_{21} - T_{12} + T_{22} & -(T_{11} + T_{21} + T_{12} + T_{22}) \end{bmatrix}; \quad (1.88)$$

$$[A] = \frac{1}{2S_{21}} \times \begin{bmatrix} S_{12}S_{21} - (1+S_{11})(S_{22}-1) & (1+S_{11})(1+S_{22}) - S_{12}S_{21} \\ (1-S_{22})(1-S_{11}) - S_{12}S_{21} & (1-S_{11})(1+S_{22}) + S_{12}S_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.89)$$

$$[Z] = \frac{1}{(1-S_{11})(S_{22}-1) + S_{12}S_{21}} \times \begin{bmatrix} 1 & 2S_{12} \\ (1+S_{11})(S_{22}-1) - S_{12}S_{21} & (1+S_{22})(1-S_{11}) + S_{12}S_{21} \end{bmatrix}; \quad (1.90)$$

$$[Y] = \frac{1}{(1+S_{11})(1+S_{22}) - S_{12}S_{21}} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} (1-S_{11})(1+S_{22}) + S_{12}S_{21} & -2S_{12} \\ 2S_{21} & (1+S_{11})(S_{22}-1) - S_{12}S_{21} \end{bmatrix}. \quad (1.91)$$

Связь между матрицами $[T]$ и $[A]$:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1} [A] \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad (1.92)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (1.93)$$

Соотношения для четырехполюсника, симметричного относительно вертикальной оси:

$$[T] = \begin{bmatrix} (T_{11}^n)^2 - (T_{12}^n)^2 & -T_{11}^n T_{21}^n + T_{12}^n T_{22}^n \\ T_{11}^n T_{21}^n - T_{22}^n T_{12}^n & -(T_{21}^n)^2 + (T_{22}^n)^2 \end{bmatrix}, \quad (1.94)$$

где индекс « n » обозначает элементы матрицы левой половины четырехполюсника.

Для произвольного четырехполюсника функция рабочего затухания (см. § 1.13)

$$L_p = |T_{11}|^2, \quad (1.95)$$

а для четырехполюсника, симметричного относительно вертикальной оси

$$L_p = |(T_{11}^n)^2 - (T_{12}^n)^2|^2. \quad (1.96)$$

1.11. ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦ

Физический смысл элементов матриц $[a]$, $[z]$ и $[y]$ можно выяснить, используя опыт холостого хода и короткого замыкания при прямом и обратном направлениях передачи.

Используя (1.14) — (1.16), получаем:

холостой ход, прямое направление передачи

$$a_{11} = \frac{U_1}{U_2}; \quad a_{21} = \frac{I_1}{U_2}; \quad z_{11} = \frac{U_1}{I_1}; \quad z_{21} = \frac{U_2}{I_1}, \quad (1.97)$$

короткое замыкание, прямое направление передачи

$$a_{12} = \frac{U_1}{I_2}; \quad a_{22} = \frac{I_1}{I_2}; \quad y_{11} = \frac{I_1}{U_1}; \quad y_{21} = \frac{I_2}{U_1}, \quad (1.98)$$

холостой ход, обратное направление передачи

$$z_{22} = -\frac{U'_1}{I'_1}; \quad z_{12} = -\frac{U'_2}{I'_1}, \quad (1.99)$$

короткое замыкание, обратное направление передачи

$$y_{22} = -\frac{I'_1}{U'_1}; \quad y_{12} = -\frac{I'_2}{U'_1}. \quad (1.100)$$

Соотношения (1.97) — (1.100) физически истолковываются следующим образом:

z_{11} — входное сопротивление четырехполюсника в режиме холостого хода при прямом направлении передачи;

z_{21} — сопротивление связи при тех же условиях;

z_{22} — входное сопротивление четырехполюсника (с обратным знаком) в режиме холостого хода при обратном направлении передачи;

z_{12} — сопротивление связи (с обратным знаком) при тех же условиях;

y_{11} — входная проводимость четырехполюсника при короткозамкнутом выходе при прямом направлении передачи;

y_{21} — проводимость связи при тех же условиях;

y_{22} — входная проводимость (с обратным знаком) четырехполюсника в режиме короткого замыкания при обратном направлении передачи;

y_{12} — проводимость связи (с обратным знаком) при тех же условиях;

a_{11} — коэффициент трансформации напряжения в четырехполюснике, поставленном в режим холостого хода при прямом направлении передачи;

$a_{21} = \frac{1}{z_{21}}$ величина, обратная сопротивлению связи в режиме холостого хода при прямом направлении передачи;

$a_{12} = \frac{1}{y_{21}}$ величина, обратная проводимости связи при короткозамкнутом выходе при прямом направлении передачи;

a_{22} — коэффициент трансформации тока в четырехполюснике в режиме короткого замыкания при прямом направлении передачи.

Физический смысл элементов матриц $[T]$ и $[S]$ можно выяснить путем включения в концевые передающие линии согласованной нагрузки [в схемах с сосредоточенными постоянными это соответствует включению на входе и выходе активных сопротивлений ρ_1 и ρ_2 (рис. 1.3)].

Полагая $\Gamma_u = 0$ либо $\Gamma'_u = 0$, имеем из (1.17) и (1.18) при прямом направлении передачи

$$T_{11} = \frac{U_{1\text{пад}}^u}{U_{2\text{пад}}^u}; \quad T_{21} = \frac{U_{1\text{отр}}^u}{U_{2\text{пад}}^u}; \quad S_{11} = \frac{U_{1\text{отр}}^u}{U_{1\text{пад}}^u}; \quad S_{21} = \frac{U_{2\text{пад}}^u}{U_{1\text{пад}}^u}, \quad (1.101)$$

и при обратном направлении передачи

$$S_{22} = \frac{U_{1\text{отр}}^{u'}}{U_{1\text{пад}}^{u'}}; \quad S_{12} = \frac{U_{2\text{пад}}^{u'}}{U_{1\text{пад}}^{u'}}. \quad (1.102)$$

Итак T_{11} — коэффициент передачи четырехполюсника, нагруженного на активные сопротивления ρ_1 и ρ_2 .

T_{21} — не имеет прямого физического смысла; в фильтрах без потерь этот коэффициент, как показано далее, определяет фильтрацию, поэтому его называют «функция фильтрации»;

S_{11} — коэффициент отражения во входной линии при согласовании выходной линии при прямом направлении передачи;

$S_{21} = \frac{1}{T_{11}}$ — обратная величина коэффициента передачи при прямом направлении передачи;

S_{12} — обратная величина коэффициента передачи при обратном направлении передачи;

S_{22} — коэффициент отражения во входной линии при согласовании выходной линии при обратном направлении передачи.

1.12. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Характеристические параметры четырехполюсника — характеристические сопротивления z_{c1} и z_{c2} , а также характеристические (или собственные) постоянные передачи g_{c1} и g_{c2} , вводятся по аналогии с волновым сопротивлением и постоянной распространения длиной линии.

При передаче слева направо

$$z_{c1} = \sqrt{\frac{a_{11} a_{12}}{a_{22} a_{21}}}; \quad g_{c1} = \ln(\sqrt{a_{11} a_{22}} + \sqrt{a_{12} a_{21}}), \quad (1.103)$$

причем $g_{c1} = b_{c1} + j a_{c1}$,

где b_{c1} — собственное затухание четырехполюсника;

a_{c1} — собственная фазовая постоянная.

При передаче справа налево

$$z_{c2} = \sqrt{\frac{a_{22} a_{12}}{a_{11} a_{21}}}; \quad g_{c2} = \ln \frac{1}{\sqrt{a_{11} a_{22}} - \sqrt{a_{12} a_{21}}}, \quad (1.104)$$

причем $g_{c2} = b_{c2} + j a_{c2}$ и

$$g_{c1} = g_{c2} = \ln |a|.$$

Решая уравнения (1.103), (1.104) относительно элементов матрицы $[a]$, получаем запись матрицы $[a]$ через характеристические параметры:

$$[a] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{z_{c1}}{z_{c2}}} e^{\frac{g_{c1}-g_{c2}}{2}} \operatorname{ch} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} & \sqrt{\frac{z_{c1}}{z_{c2}}} e^{\frac{g_{c1}-g_{c2}}{2}} \operatorname{sh} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{z_{c1} z_{c2}}} e^{\frac{g_{c1}-g_{c2}}{2}} \operatorname{sh} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} & \sqrt{\frac{z_{c2}}{z_{c1}}} e^{\frac{g_{c1}-g_{c2}}{2}} \operatorname{ch} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} \end{bmatrix}, \quad (1.105)$$

откуда для обратимой системы ($g_{c1} = g_{c2} = g_c$)

$$[a] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{z_{c1}}{z_{c2}}} \operatorname{ch} g_c & \sqrt{z_{c1} z_{c2}} \operatorname{sh} g_c \\ \frac{1}{\sqrt{z_{c1} z_{c2}}} \operatorname{sh} g_c & \sqrt{\frac{z_{c2}}{z_{c1}}} \operatorname{ch} g_c \end{bmatrix}, \quad (1.106)$$

а также для системы симметричной ($a_{11} = a_{22}$, $z_{c1} = z_{c2} = z_c$)

$$[a] = \begin{bmatrix} \operatorname{ch} g_c & z_c \operatorname{sh} g_c \\ \frac{1}{z_c} \operatorname{sh} g_c & \operatorname{ch} g_c \end{bmatrix} \quad (1.107)$$

антисимметричной

$$[a] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{z_{c1}}{z_{c2}}} \operatorname{ch} g_c & R \operatorname{sh} g_c \\ \frac{1}{R} \operatorname{sh} g_c & \sqrt{\frac{z_{c2}}{z_{c1}}} \operatorname{ch} g_c \end{bmatrix}. \quad (1.108)$$

При заданных характеристических параметрах произвольного четырехполюсника с помощью матрицы $[a]$ легко выделить матрицы обратимой и симметричной частей

$$\begin{aligned} [a] &= \begin{bmatrix} \frac{g_{c1}-g_{c2}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{g_{c1}-g_{c2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{z_{c1}}{z_{c2}}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{z_{c2}}{z_{c1}}} \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} & z_{c1} \operatorname{sh} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} \\ \frac{1}{z_{c1}} \operatorname{sh} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} & \operatorname{ch} \frac{g_{c1}+g_{c2}}{2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1.109)$$

Здесь первый слева сомножитель относится к идеальному преобразователю мощности, второй — к идеальному трансформатору и третий — к симметричному четырехполюснику.

В цепочке четырехполюсников, согласованных по принципу равенства характеристических сопротивлений (рис. 1.8), имеют место следующие закономерности:

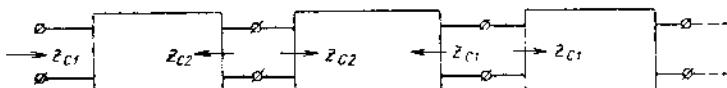


Рис. 1.8. Цепочка четырехполюсников, согласованных по характеристическим сопротивлениям.

- а) характеристическая (собственная) постоянная передачи цепочки равна сумме собственных постоянных передач составляющих;
- б) характеристические сопротивления цепочки равны характеристическим сопротивлениям крайних четырехполюсников со стороны их внешних зажимов.

1.13. РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Рабочая постоянная передачи определяется как половина натурального логарифма (или десятикратное значение десятичного логарифма) от отношения мощности, которую отдает генератор в согласованную (в смысле равенства комплексных сопротивлений) нагрузку (рис. 1.9), к той мощности, которая поступает от этого генератора через четырехполюсник в заданную нагрузку (рис. 1.10). Как и ранее под мощностью понимают произведение комплексов напряжения и тока, что позволяет оценивать как амплитудные, так и фазовые соотношения.

При передаче в прямом направлении (индекс 1) рабочая постоянная передачи (или «рабочая мера передачи») равна

$$g_{p1} = b_{p1} + j a_{p1} = \frac{1}{2} \ln \frac{E^2}{U_2 I_2}, \quad (1.110)$$

где b_{p1} — рабочее затухание;
 a_{p1} — фаза рабочей меры передачи.

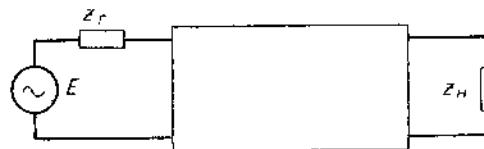


Рис. 1.9. Согласованное включение генератора.

Величина b_{p1} определяет отношение кажущихся мощностей:

$$\left. \begin{aligned} b_{p1} &= \frac{1}{2} \ln \frac{|E^2|}{|U_2 I_2|} \text{ [непер],} \\ b_{p1} &= 10 \lg \frac{|E^2|}{|U_2 I_2|} \text{ [декибелл].} \end{aligned} \right\} \quad (1.111)$$

Если учесть соотношения:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= E - I_1 z_r, \\ U_2 &= I_2 z_n, \\ U_1 &= a_{11} U_2 + a_{12} I_2, \\ I_1 &= a_{21} U_2 + a_{22} I_2, \end{aligned} \right\} \quad (1.112)$$

то выражение для рабочего затухания приведется к виду:

$$b_{p1} = 10 \lg \left| \frac{1}{2} \left\{ a_{11} \sqrt{\frac{z_n}{z_r}} + \frac{a_{12}}{\sqrt{z_n z_r}} + a_{21} \sqrt{z_n z_r} + a_{22} \sqrt{\frac{z_r}{z_n}} \right\}^2 \right|. \quad (1.113)$$

Выражение, стоящее под знаком логарифма

$$L_p = \left| \frac{1}{2} \left\{ a_{11} \sqrt{\frac{z_n}{z_r}} + \frac{a_{12}}{\sqrt{z_n z_r}} + a_{21} \sqrt{z_n z_r} + a_{22} \sqrt{\frac{z_r}{z_n}} \right\}^2 \right|^2, \quad (1.114)$$

называют функцией рабочего затухания.

При обратном направлении передачи

$$b_{p2} = 10 \lg \left| \frac{1}{|a|} \frac{1}{2} \left\{ a_{22} \sqrt{\frac{z_r}{z_n}} + \frac{a_{12}}{\sqrt{z_n z_r}} + a_{21} \sqrt{z_n z_r} + a_{11} \sqrt{\frac{z_n}{z_r}} \right\}^2 \right|^2, \quad (1.115)$$

можно показать, что

$$g_{p1} - g_{p2} = 10 \lg |a|. \quad (1.116)$$

Вносимая постоянная передачи определяется как половина натурального логарифма (или десятикратное значение десятичного логарифма) от отношения мощности, которую отдает генератор в заданную нагрузку при непосредственном соединении (рис. 1.11), к мощности, которая поступает от этого генератора в ту же нагрузку через четырехполюсник (рис. 1.10). Под мощностью понятному подразумевается произведение комплексов напряжения и тока.

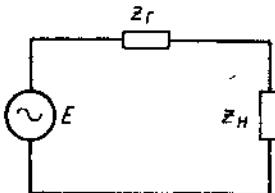


Рис. 1.11. Непосредственное соединение генератора с нагрузкой.

При передаче в прямом направлении согласно определению имеем

$$g_{p1} = \frac{1}{2} \ln \frac{E^2}{U_2 I_2}. \quad (1.117)$$

Рабочая и вносимая постоянные передачи совпадают друг с другом, если сопротивления нагрузки и генератора равны.

Действующее затухание определяется как половину натурального логарифма (или десятикратное значение десятичного логарифма) от отношения максимально возможной активной мощности, которую может отдать генератор к той активной мощности, которая поступает от этого генератора через четырехполюсник в заданную нагрузку:

$$b_d = \frac{1}{2} \ln \frac{E^2}{4R_g \operatorname{Re}(U_2 I_2^*)}. \quad (1.118)$$

Действующее затухание не получило широкого применения вследствие трудностей, связанных с его расчетом и измерением. Кроме того, b_d не является аналитической функцией параметра $j\omega$, что крайне затрудняет синтез цепи по заданной частотной характеристике действующего затухания.

При $z_n = R_n$ и $z_r = R_r$ действующее затухание совпадает с рабочим затуханием и, следовательно, условия эффективности передачи и удобства синтеза совпадают.

Сопротивление передачи или приведенное сопротивление определяется как отношение э. д. с. на входе четырехполюсника к току в нагрузке

$$z_p = \frac{E}{I_2}. \quad (1.119)$$

Этот параметр с параметрами четырехполюсника и сопротивлениями z_n и z_r связан следующим образом:

$$z_p = a_{11} z_n + a_{12} + a_{21} z_n z_r + a_{22} z_r, \quad (1.120)$$

откуда следует

$$L_p = \left| \frac{z_p}{2 \sqrt{z_n z_r}} \right|^2. \quad (1.121)$$

1.14. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ОБРАТИМЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Обратимый четырехполюсник можно представить в виде схемы, состоящей из минимального числа элементов. Поскольку обратимый четырехполюсник определяется тремя комплексными параметрами, то естественно выбрать схему, состоящую из трех элементов (T и P схемы рис. 1.12 и 1.13). При ее построении вопросы физической реализуемости не учитываются и величины сопротивлений, индуктивностей и емкостей, входящих в схему замещения, могут получать отрицательные значения.

Если задана матрица $[z]$ Т-образной схемы, то сопротивления z_1 , z_3 продольных плеч и z_2 поперечного плеча (рис. 1.13) выражаются через элементы матрицы следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_{11} + z_{12}, \\ z_2 &= -z_{12}, \\ z_3 &= z_{12} - z_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (1.122)$$

Для П-образной схемы (рис. 1.13) удобно использовать матрицу $[y]$; в этом случае связи имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_{11} + y_{12}; \\ y_2 &= -y_{12}; \\ y_3 &= y_{12} - y_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (1.123)$$

На СВЧ удобно задавать элементы матрицы рассеяния. Ниже даны значения нормированных сопротивлений Т- и П-образных схем, выраженные через элементы матрицы $[S]$ для случая симметричного четырехполюсника при $\rho_1 = \rho_2 = \rho$:

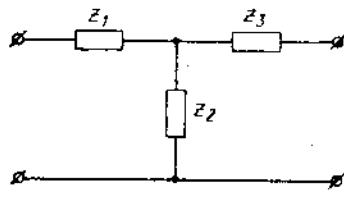


Рис. 1.12. Т-образная схема.

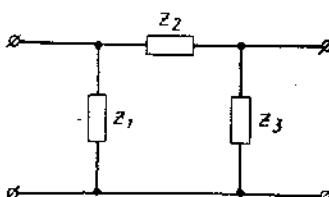


Рис. 1.13. П-образная схема.

$$Z_1 = Z_3 = \frac{1 + S_{11} - S_{12}}{1 - S_{11} + S_{12}}, \quad (1.124)$$

$$Z_2 = \frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})^2 - S_{12}^2}; \quad (1.125)$$

$$Y_1 = Y_3 = \frac{1 - S_{11} - S_{12}}{1 + S_{11} + S_{12}}; \quad (1.126)$$

$$Y_2 = \frac{2S_{12}}{(1 + S_{11})^2 - S_{12}^2}. \quad (1.127)$$

1.15. МИНИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

Волновая матрица передачи обратимого, реактивного симметричного либо антиметричного четырехполюсника может быть выражена через комплексный коэффициент передачи T_{11} .

Для симметричного четырехполюсника имеем:

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & -j\sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \\ j\sqrt{|T_{11}|^2 - 1} & T_{11}^* \end{bmatrix}. \quad (1.128)$$

а для антиметричного

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \\ \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} & T_{11}^* \end{bmatrix}. \quad (1.129)$$

Соответствующие выражения для матрицы $[a]$ имеют вид:
для симметричного четырехполюсника при $\rho_1 = \rho_2 = \rho$:

$$[a] = \begin{bmatrix} \operatorname{Re} T_{11} & j\rho(\operatorname{Im} T_{11} + \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}) \\ j\frac{1}{\rho}(\operatorname{Im} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}) & \operatorname{Re} T_{11} \end{bmatrix}; \quad (1.130)$$

для антиметричного четырехполюсника при $\rho_1 \neq \rho_2$:

$$[a] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}(\operatorname{Re} T_{11} + \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}) & j\sqrt{\rho_1 \rho_2} \operatorname{Im} T_{11} \\ j\frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \operatorname{Im} T_{11} & \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}(\operatorname{Re} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}) \end{bmatrix}. \quad (1.131)$$

Для синтеза фильтров лестничной структуры используются нормированные сопротивления холостого хода, либо короткого замыкания. Их можно найти из последних выражений.

Симметричный четырехполюсник:

$$\left. \begin{aligned} Z_{k3} = Z'_{k3} &= \frac{j(\operatorname{Im} T_{11} + \sqrt{|T_{11}|^2 - 1})}{\operatorname{Re} T_{11}}, \\ Z_{xx} = Z'_{xx} &= \frac{\operatorname{Re} T_{11}}{j(\operatorname{Im} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1})}, \end{aligned} \right\} \quad (1.132)$$

где

$$Z_{k3} = \frac{z_{k3}}{\rho}; \quad Z_{xx} = \frac{z_{xx}}{\rho},$$

Антиметричный четырехполюсник

$$\left. \begin{aligned} Z_{k3} = \frac{j \operatorname{Im} T_{11}}{\operatorname{Re} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}}, \\ Z_{xx} = \frac{\operatorname{Re} T_{11} + \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}}{j \operatorname{Im} T_{11}}, \end{aligned} \right\} \quad (1.133)$$

где

$$Z_{k3} = \frac{z_{k3}}{\rho_1}; \quad Z_{xx} = \frac{z_{xx}}{\rho_1},$$

а при обратном направлении передачи

$$\left. \begin{aligned} Z'_{k3} = \frac{j \operatorname{Im} T_{11}}{\operatorname{Re} T_{11} + \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}}, \\ Z'_{xx} = \frac{\operatorname{Re} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1}}{j \operatorname{Im} T_{11}}, \end{aligned} \right\} \quad (1.134)$$

$$\text{где } Z'_{k_3} = \frac{z'_{k_3}}{\rho_2}; \quad Z'_{x_3} = \frac{z'_{x_3}}{\rho_2}.$$

Условия физической реализуемости четырехполюсника, выраженные в терминах волновых матриц, см. в работе [3].

1.16. ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ПРОСТЕЙШИХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

1. Последовательное включение сопротивления¹ (рис. 1.14)

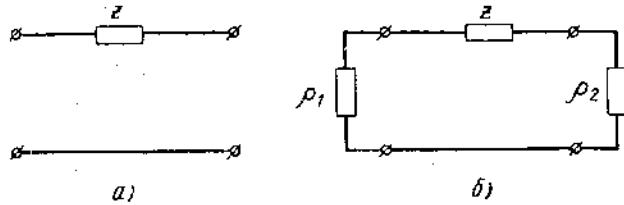


Рис. 1.14. Последовательное включение сопротивления.

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1.135)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{z} & -\frac{1}{z} \\ \frac{1}{z} & -\frac{1}{z} \end{bmatrix}; \quad (1.136)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{z+R-1}{z+R+1} & \frac{2\sqrt{R}}{z+R+1} \\ \frac{-2\sqrt{R}}{z+R+1} & \frac{z-R+1}{z+R+1} \end{bmatrix}; \quad (1.137)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{z+R+1}{2\sqrt{R}} & \frac{R-z-1}{2\sqrt{R}} \\ \frac{z+R-1}{2\sqrt{R}} & \frac{R-z+1}{2\sqrt{R}} \end{bmatrix}, \quad (1.138)$$

где

$$Z = \frac{z}{\rho_1}; \quad R = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

¹ Здесь и далее рисунки «а» относятся к классическим матрицам, а «б» — к волновым.

2. Параллельное включение сопротивления (рис. 1.15):

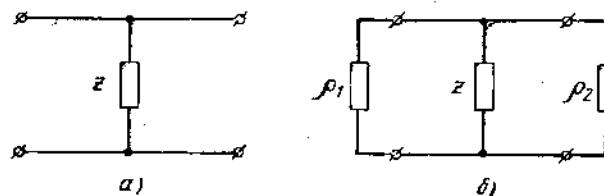


Рис. 1.15. Параллельное включение сопротивления.

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{z} & 1 \end{bmatrix}; \quad (1.139)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} z & -z \\ z & -z \end{bmatrix}; \quad (1.140)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{R(1-Y)-1}{R(1+Y)+1} & \frac{2\sqrt{R}}{R(1+Y)+1} \\ \frac{2\sqrt{R}}{R(1+Y)+1} & \frac{1-R(1+Y)}{R(1+Y)+1} \end{bmatrix}; \quad (1.141)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{R(1+Y)+1}{2\sqrt{R}} & \frac{R(1+Y)-1}{2\sqrt{R}} \\ \frac{R(1-Y)-1}{2\sqrt{R}} & \frac{R(1-Y)+1}{2\sqrt{R}} \end{bmatrix}, \quad (1.142)$$

где

$$Z = \frac{z}{\rho_1}; \quad R = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

3. Т-образная схема (рис. 1.16):

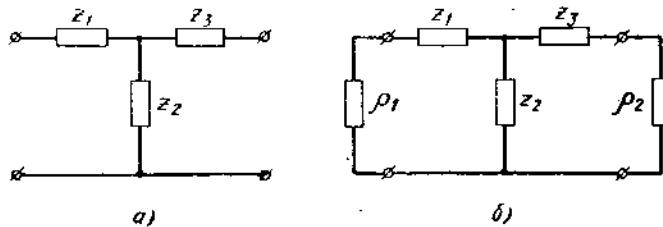


Рис. 1.16. Т-образная схема.

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 + \frac{z_1}{z_2} & z_1 + z_3 + \frac{z_1 z_3}{z_2} \\ \frac{1}{z_2} & 1 + \frac{z_3}{z_2} \end{bmatrix}; \quad (1.143)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 & -z_2 \\ z_2 & -(z_2 + z_3) \end{bmatrix}; \quad (1.144)$$

$$[y] = \frac{1}{y_1 + y_2 + y_3} \begin{bmatrix} y_1(y_2 + y_3) & -y_1 y_3 \\ y_1 y_3 & -y_3(y_1 + y_2) \end{bmatrix}, \quad (1.145)$$

где

$$y_i = \frac{1}{z_i}.$$

$$\begin{aligned} [S] = & \frac{1}{Z_2(Z_1 + 1) + (Z_3 + R)(Z_1 + Z_2 + 1)} \times \\ & \times \left[\begin{array}{cc} Z_2(Z_1 - 1) + (Z_3 + R)(Z_1 + Z_2 - 1) & 2\sqrt{RZ_2} \\ 2\sqrt{RZ_2} & Z_2(Z_1 + 1) + (Z_3 - R)(Z_1 + Z_2 + 1) \end{array} \right]; \end{aligned} \quad (1.146)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{Z_2(Z_1 + 1) + (Z_3 + R)(Z_1 + Z_2 + 1)}{2\sqrt{RZ_2}}, \\ T_{12} &= \frac{(R - Z_3)(Z_1 + Z_2 + 1) - Z_2(Z_1 + 1)}{2\sqrt{RZ_2}}, \\ T_{21} &= \frac{Z_2(Z_1 - 1) + (Z_3 + R)(Z_1 + Z_2 - 1)}{2\sqrt{RZ_2}}, \\ T_{22} &= \frac{1 + T_{12}T_{21}}{T_{11}} \end{aligned} \right\} \quad (1.147)$$

где

$$Z_1 = \frac{z_1}{\rho_1}; \quad Z_2 = \frac{z_2}{\rho_1}; \quad Z_3 = \frac{z_3}{\rho_1}; \quad R = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

$$z_{c1} = \sqrt{\frac{z_1 + z_2}{z_2 + z_3}(z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3)}; \quad (1.148)$$

$$z_{c2} = \sqrt{\frac{z_2 + z_3}{z_1 + z_2}(z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3)}; \quad (1.149)$$

$$\operatorname{ch} g_c = \sqrt{\left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right)\left(1 + \frac{z_3}{z_2}\right)}. \quad (1.150)$$

4. П-образная схема (рис. 1.17):

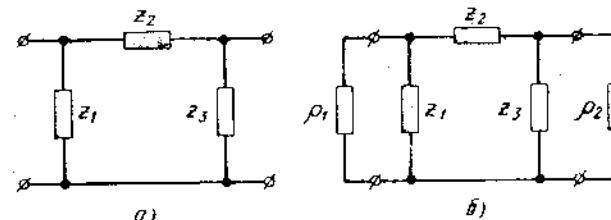


Рис. 1.17. П-образная схема.

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 + \frac{z_2}{z_3} & z_2 \\ \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_3} + \frac{z_2}{z_1 z_3} & 1 + \frac{z_2}{z_1} \end{bmatrix}; \quad (1.151)$$

$$[z] = \frac{1}{z_1 + z_2 + z_3} \begin{bmatrix} z_1(z_2 + z_3) & -z_1 z_3 \\ z_1 z_3 & -z_3(z_1 + z_2) \end{bmatrix}; \quad (1.152)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} y_1 + y_2 & -y_2 \\ y_2 & -(y_2 + y_3) \end{bmatrix}, \quad (1.153)$$

$$\text{где } y_i = \frac{1}{z_i};$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{Z_1 Z_2 Z_3 + R Z_1 (Z_2 + Z_3) + Z_3 (Z_1 + Z_2) + R (Z_1 + Z_2 + Z_3)}{2\sqrt{R} Z_1 Z_3}, \\ T_{12} &= \frac{R [Z_1 (Z_2 + Z_3) + (Z_1 + Z_2 + Z_3)] - Z_3 (Z_1 + Z_2 + Z_1 Z_2)}{2\sqrt{R} Z_1 Z_3}, \\ T_{21} &= \frac{R [Z_1 (Z_2 + Z_3) - (Z_1 + Z_2 + Z_3)] + Z_3 [Z_1 Z_2 - (Z_1 + Z_2)]}{2\sqrt{R} Z_1 Z_3}. \end{aligned} \right\} \quad (1.154)$$

$$\begin{aligned} T_{22} &= \frac{Z_3^2 [(Z_1 + Z_2)^2 - Z_1^2 (Z_2^2 - 2R)] +}{2Z_1 Z_3 \sqrt{R} \{Z_3 [(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2] + \\ &\quad + R^2 [Z_1^2 (Z_2 + Z_3)^2 - (Z_1 + Z_2 + Z_3)^2\}]}, \\ &\quad + R [Z_1 (Z_2 + Z_3) + (Z_1 + Z_2 + Z_3)] \} \end{aligned}$$

где

$$Z_1 = \frac{z_1}{\rho_1}; \quad Z_2 = \frac{z_2}{\rho_1}; \quad Z_3 = \frac{z_3}{\rho_1}; \quad R = \frac{\rho_2}{\rho_1};$$

$$z_{c1} = \sqrt{\frac{z_2 + z_3}{z_1 + z_2} \cdot \frac{z_1^2 z_2}{z_1 + z_2 + z_3}}; \quad (1.155)$$

$$z_{c2} = \sqrt{\frac{z_1 + z_2}{z_2 + z_3} \cdot \frac{z_2 z_3^2}{z_1 + z_2 + z_3}}; \quad (1.156)$$

$$\operatorname{ch} g_c = \sqrt{\left(1 + \frac{z_2}{z_3}\right) \left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right)}. \quad (1.157)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \frac{Z_1 Z_2 Z_3 - Z_3 (Z_1 + Z_2) + R Z_1 (Z_2 + Z_3) - R (Z_1 + Z_2 + Z_3)}{D}, \\ S_{12} &= \frac{2 \sqrt{R Z_1 Z_3}}{D}, \\ S_{21} &= \frac{2 \sqrt{R Z_1 Z_3}}{D}, \\ S_{22} &= \frac{Z_1 Z_2 Z_3 - R Z_1 (Z_2 + Z_3) + Z_3 (Z_1 + Z_2) - R (Z_1 + Z_2 + Z_3)}{D}, \end{aligned} \right\} \quad (1.158)$$

где

$$D = Z_1 Z_2 Z_3 + Z_3 (Z_1 + Z_2) + R Z_1 (Z_2 + Z_3) + R (Z_1 + Z_2 + Z_3);$$

5. Отрезок однородной передающей линии без потерь (рис. 1.18):

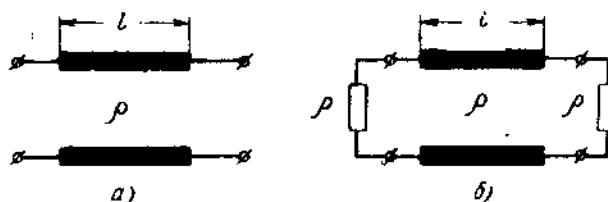


Рис. 1.18. Отрезок однородной передающей линии без потерь.

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & j\rho \sin \theta \\ j \sin \theta & \rho \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (1.159)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j\rho \operatorname{ctg} \theta & \frac{j\rho}{\sin \theta} \\ -\frac{j\rho}{\sin \theta} & j\rho \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (1.160)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} \frac{\operatorname{clg} \theta}{j\rho} & -\frac{1}{j\rho \sin \theta} \\ \frac{1}{j\rho \sin \theta} & -\frac{\operatorname{ctg} \theta}{j\rho} \end{bmatrix}; \quad (1.161)$$

$$\text{где } \theta = \frac{2\pi l}{\lambda};$$

λ — длина волны в передающей линии.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\theta} \\ e^{-j\theta} & 0 \end{bmatrix}; \quad (1.162)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix}; \quad (1.163)$$

$$z_{c1} = z_{c2} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = p; \quad (1.164)$$

$$g_c = j\omega \sqrt{L_1 C_1} \cdot l = j0, \quad (1.165)$$

где L_1, C_1 — погонные индуктивность и емкость;
 ω — круговая частота.

6. Прямое соединение («скакок волнового сопротивления») (рис. 1.19):

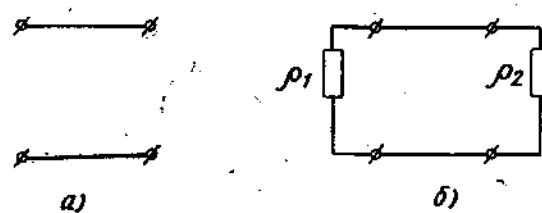


Рис. 1.19. Прямое соединение «скакок волнового сопротивления».

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1.166)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{R-1}{R+1} & \frac{2\sqrt{R}}{R+1} \\ \frac{2\sqrt{R}}{R+1} & -\frac{R-1}{R+1} \end{bmatrix}; \quad (1.167)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{R+1}{2\sqrt{R}} & \frac{R-1}{2\sqrt{R}} \\ \frac{R-1}{2\sqrt{R}} & \frac{R+1}{2\sqrt{R}} \end{bmatrix}, \quad (1.168)$$

где $R = \frac{\rho_2}{\rho_1}$.

1.17. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИНОМОВ ЧЕБЫШЕВА

Полиномами Чебышева первого и второго рода называют соответственно выражения вида [9]

$$T_n(x) = \cos(n \arccos x); \quad (1.169)$$

$$U_{n-1}(x) = \frac{\sin(n \arccos x)}{\sqrt{1-x^2}}. \quad (1.170)$$

Среди всех полиномов степени n , имеющих одинаковый коэффициент при старшем члене x , полином $T_n(x)$ наименее уклоняется от нуля в интервале $(-1, 1)$. Это свойство окажется полезным при решении задач согласования. Среди всех полиномов, абсолютные значения которых в интервале $(-1, 1)$ не превышают некоторой заданной величины, полином $T_n(x)$ вне этого интервала принимает наибольшее по абсолютной величине значение.

Полиномы Чебышева первого рода четного $n = 2N$ и нечетного $n = 2N - 1$ порядков записываются в виде конечных степенных рядов [10]:

$$T_{2N}(x) = \sum_{q=0}^N a_{2q}^{2N} x^{2q}; \quad (1.171)$$

$$T_{2N-1}(x) = \sum_{q=1}^N a_{2q-1}^{2N-1} x^{2q-1}, \quad (1.172)$$

где

$$a_{2q}^{2N} = \frac{(-1)^{N-q} 2N(N+q-1)! 2^{2q-1}}{(2q)!(N-q)!}; \quad (1.173)$$

$$a_{2q-1}^{2N-1} = \frac{(-1)^{N-q} (2N-1)(N+q-2)! 2^{2q-2}}{(2q-1)!(N-q)!}. \quad (1.174)$$

В табл. 1.1 приводятся развернутые выражения для полиномов Чебышева первого рода первого — двадцать первого порядков, полученные с помощью (1.171) — (1.174).

Если независимая переменная

$$x = \alpha \cos \theta, \quad (1.175)$$

тепенные тригонометрические ряды (1.171) и (1.172) преобразуются в гармонические полиномы (ряды Фурье) [11]:

$$T_{2N}(\alpha \cos \theta) = \sum_{m=0}^N A_{2m}^{2N} \cos 2m\theta; \quad (1.176)$$

$$T_{2N-1}(\alpha \cos \theta) = \sum_{m=1}^N A_{2m-1}^{2N-1} \cos [(2m-1)\theta], \quad (1.177)$$

где

$$A_{2m}^{2N} = \sum_{q=m}^N \frac{2(-1)^{N-q} N(N+q-1)!}{(q-m)!(q+m)!(N-q)!} \alpha^{2q}, \quad (1.178)$$

$$A_0^{2N} = \sum_{q=0}^N \frac{N(N+q-1)! (-1)^{N-q}}{q! q! (N-q)!} \alpha^{2q}; \quad (1.179)$$

$$A_{2m-1}^{2N-1} = \sum_{q=m}^N \frac{(-1)^{N-q} (2N-1)(N+q-2)!}{(q-m)!(q-1+m)!(N-q)!} \alpha^{2q-1}. \quad (1.180)$$

Нули полиномов $T_n(x)$ [см. (1.169)] определяются равенством

$$T_n(x_n) = \cos(n \arccos x_n) = \cos(n \varphi_n) = 0.$$

Следовательно,

$$\varphi_n = \frac{(2m-1)\pi}{2n},$$

а

$$x_n = \cos \varphi_n = \cos \left[\frac{(2m-1)\pi}{2n} \right], \quad (1.181)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, n$.

Положение экстремумов $T_n(x)$ находится из уравнения

$$\frac{d[T_n(x)]}{dx} = \frac{n \sin(n \arccos x)}{\sqrt{1-x^2}} = 0,$$

откуда

$$x_3 = \cos \frac{m\pi}{n}, \quad (1.182)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, n$.

Поскольку

$$T_n \left(\cos \frac{m\pi}{n} \right) = \cos m\pi = (-1)^m,$$

где

$$m = 1, 2, 3, \dots, n,$$

то все максимумы равны $(+1)$, а минимумы (-1) .

В крайних точках основного промежутка $[-1; +1]$ полином $T_n(x)$ принимает значения

$$T_n(+1) = 1; \quad T_n(-1) = (-1)^n. \quad (1.183)$$

За границами промежутка $-1 < x < 1$ графики полиномов Чебышева первого рода монотонно возрастают или убывают.

На рис. 1.20 показаны кривые, представляющие собой зависимости

$$T_n(x) = f(x),$$

$$n = 1 \div 4.$$

Связь между полиномами Чебышева первого и второго рода определяется соотношением [9]

$$U_{n-1}(x) = \frac{1}{n} T'_n(x). \quad (1.184)$$

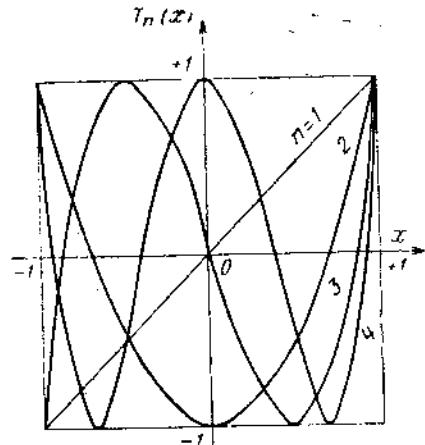


Рис. 1.20. Полиномы Чебышева 1-го рода для $n = 1 \div 4$.

При этом [см. (1.171) и (1.172)] для $n = 2N$

$$U_{2N-1}(x) = \sum_{q=1}^N \frac{q}{N} a_{2q}^{2N} x^{2q-1}, \quad (1.185)$$

и соответственно для $n = 2N - 1$

$$U_{2N-2}(x) = \sum_{q=1}^N \frac{2q-1}{2N-1} a_{2q-1}^{2N-1} x^{2q-2}. \quad (1.186)$$

Полиномы Чебышева второго рода до 20-го порядка даны в табл. 1.2.

Нули полиномов $U_n(x)$ определяются равенствами

$$x_m = \cos\left(\frac{m\pi}{n+1}\right), \quad (1.187)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, n$.

В пределах основного промежутка $-1 \leq x \leq 1$

$$|U_n(x)| \leq \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

На его границах $| - 1; + 1 |$ достигаются величины

$$|U_n(x)| = n + 1.$$

Типичная зависимость

$$U_n(x) = \varphi(x)$$

приводится на рис. 1.21.

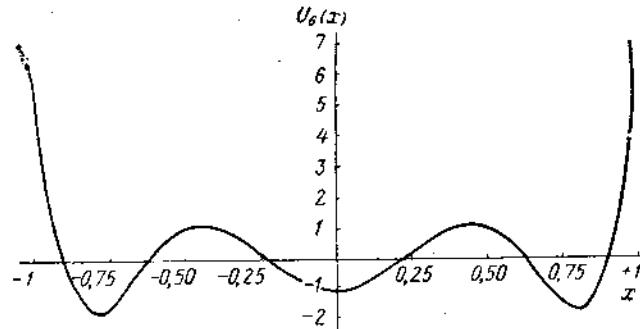


Рис. 1.21. Полиномы Чебышева 2-го рода для $n = 6$.

1.18. ЦЕПОЧКИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ. НЕОДНОРОДНЫЕ ЛИНИИ

Элементы матрицы цепочки из « k » четырехполюсников (рис. 1.22) определяются рекуррентными соотношениями:

$$\left. \begin{array}{l} A_k = a_k A_{k-1} + b_k C_{k-1}; \\ C_k = c_k A_{k-1} + d_k C_{k-1}; \\ B_k = a_k B_{k-1} + b_k D_{k-1}; \\ D_k = c_k B_{k-1} + d_k D_{k-1}; \end{array} \right\} \quad (1.188)$$

где строчными буквами (a_m, b_m, c_m, d_m) обозначены элементы матрицы m -го звена, а прописными буквами (A_m, B_m, C_m, D_m) — элементы матрицы системы из « m » звеньев ($m = 1, 2, 3, \dots, k$).

Соотношения (1.188) относятся к любой из четырех матриц $[a]$, $[t]$, $[A]$, $[T]$ и являются исходными для построения уравнений двух типов: разностных и сумматорных. Аналогом этих уравнений при непрерывном изменении параметров являются дифференциальные и интегральные уравнения.

Разностные уравнения (уравнения в конечных разностях), полученные из (1.188) путем разделения переменных, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} A_{k+1} &= \frac{a_{k+1} b_k + b_{k+1} d_k}{b_k} A_k - \frac{b_{k+1}}{b_k} (a_k d_k - b_k c_k) A_{k-1}, \\ C_{k+1} &= \frac{c_{k+1} a_k + d_{k+1} c_k}{c_k} C_k - \frac{c_{k+1}}{c_k} (a_k d_k - b_k c_k) C_{k-1}, \\ B_{k+1} &= \frac{a_{k+1} b_k + b_{k+1} d_k}{b_k} B_k - \frac{b_{k+1}}{b_k} (a_k d_k - b_k c_k) B_{k-1}, \\ D_{k+1} &= \frac{c_{k+1} a_k + d_{k+1} c_k}{c_k} D_k - \frac{c_{k+1}}{c_k} (a_k d_k - b_k c_k) D_{k-1}. \end{aligned} \right\} \quad (1.189)$$

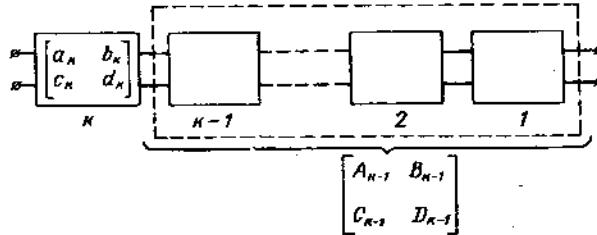


Рис. 1.22. Цепочка четырехполюсников.

В случае цепочки одинаковых обратимых четырехполюсников решение этих уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^k = \\ = \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \nu k + \frac{a-d}{2} \frac{\operatorname{sh} \nu k}{\operatorname{sh} \nu} & b \frac{\operatorname{sh} \nu k}{\operatorname{sh} \nu} \\ c \frac{\operatorname{sh} \nu k}{\operatorname{sh} \nu} & \operatorname{ch} \nu k - \frac{a-d}{2} \frac{\operatorname{sh} \nu k}{\operatorname{sh} \nu} \end{bmatrix}, \quad (1.190)$$

где

$$\nu = \operatorname{Ar} \operatorname{ch} \frac{a+d}{2}. \quad (1.191)$$

В случае одипаковых необратимых четырехполюсников выражение (1.190) усложняется незначительно [3]. Возможны также решения и для некоторых других частных случаев; они приведены в [3].

Более широкий класс цепочек можно исследовать с помощью сумматорных уравнений; они вытекают из тех же рекуррентных соотношений (1.188), если воспользоваться последовательными подстановками при убывающих значениях индекса $\langle k \rangle$ [12].

$$\left. \begin{aligned} A_k &= \prod_{i=1}^k a_i + \sum_{m=1}^k b_m C_{m-1} \prod_{i=m+1}^k a_i, \\ C_k &= \sum_{m=1}^k c_m A_{m-1} \prod_{i=m+1}^k d_i; \end{aligned} \right\} \quad (1.192)$$

$$\left. \begin{aligned} B_k &= \sum_{m=1}^k b_m D_{m-1} \prod_{i=m+1}^k a_i, \\ D_k &= \prod_{i=1}^k d_i + \sum_{m=1}^k c_m B_{m-1} \prod_{i=m+1}^k d_i. \end{aligned} \right\} \quad (1.194)$$

$$\left. \begin{aligned} B_k &= \sum_{m=1}^k b_m D_{m-1} \prod_{i=m+1}^k a_i, \\ D_k &= \prod_{i=1}^k d_i + \sum_{m=1}^k c_m B_{m-1} \prod_{i=m+1}^k d_i. \end{aligned} \right\} \quad (1.195)$$

Первая пара является системой уравнений относительно A и C , вторая — относительно B и D . Решение сумматорных уравнений проводится методом итераций [3].

Наиболее часто используется первая итерация, имеющая вид:

$$\begin{bmatrix} A_k^{(1)} & B_k^{(1)} \\ C_k^{(1)} & D_k^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^k a_i & \sum_{m=1}^k b_m \prod_{i=1}^{m-1} d_i \prod_{i=m+1}^k a_i \\ \sum_{m=1}^k c_m \prod_{i=1}^{m-1} a_i \prod_{i=m+1}^k d_i & \prod_{i=1}^k d_i \end{bmatrix}. \quad (1.196)$$

Этой матрице соответствует матрица $[S]$:

$$[S] = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^k S_{11} m \prod_{i=m+1}^k H_i & \frac{1}{\prod_{i=1}^k a_i} \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^k a_i} & \sum_{m=1}^k S_{22} m \prod_{i=1}^{m-1} H_i \end{bmatrix}, \quad (1.197)$$

где

$$H_i = \frac{d_i}{a_i}. \quad (1.198)$$

Выражение (1.197) показывает, что в первом приближении собственный коэффициент отражения цепочки четырехполюсников есть сумма всех собственных коэффициентов отражения звеньев, принесенных ко входу системы с помощью произведения фазовых множителей $\prod_{i=1}^{m-1} H_i$. Последующие приближения учитывают многократные отражения в системе [12].

Если звено цепочки представляет собой отрезок однородной линии с малой неоднородностью (рис. 1.23), выражение (1.197) приводится к виду:

$$[S] = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^k S_{11m} e^{-2\gamma(k-m)\Delta x} & e^{-\gamma k \Delta x} \\ e^{-\gamma k \Delta x} & \sum_{m=1}^k S_{22m} e^{-2\gamma(m-1)\Delta x} \end{bmatrix}, \quad (1.199)$$

где S_{11m} , S_{22m} — элементы матрицы рассеяния m -й неоднородности; γ — постоянная распространения соединительного отрезка длиной Δx однородной линии (рис. 1.23).

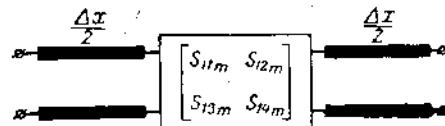


Рис. 1.23. Отрезок длинной линии с неоднородностью.

Существенный интерес представляет частный случай звена, в котором неоднородность обусловливается скачком волновых сопротивлений (рис. 1.24). Цепочка такого вида представляет собой ступенчатую систему. Предельный случай ступенчатой системы



Рис. 1.24. Отрезок длинной линии со скачком волнового сопротивления.

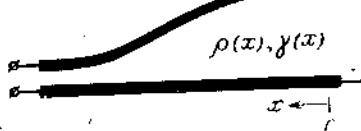


Рис. 1.25. Плавно-неоднородная линия.

[12] называется длинной линией с непрерывно изменяющимися параметрами [13], или иначе — плавно-неоднородной линией (рис. 1.25). Предельный переход в сумматорных уравнениях дает интегральные уравнения для элементов матрицы $[T]$ плавно-неоднородной линии [3, 12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A(l) = e^{\int_0^l \gamma(x) dx} + \int_0^l N(x) C(x) e^{\int_x^l \gamma(x) dx} dx, \\ C(l) = \int_0^l N(x) A(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx, \end{array} \right. \quad (1.200)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B(l) = \int_0^l N(x) D(x) e^{\int_x^l \gamma(x) dx} dx, \\ D(l) = e^{-\int_0^l \gamma(x) dx} + \int_0^l N(x) B(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx, \end{array} \right.$$

где l — длина неоднородной линии;

$$N(x) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln \rho(x); \quad (1.200a)$$

$\rho(x)$, $\gamma(x)$ — волновое сопротивление и постоянная распространения в точке « x » линии.

Эти уравнения сводятся к интегральным уравнениям типа Вольтерра (2-го рода), т. е. к хорошо изученному классу уравнений с быстросходящимся итерационным процессом решения и удобной оценкой погрешности приближенного решения [3].

Практически обычно ограничиваются первой итерацией («первое приближение»):

$$\left[\begin{array}{cc} A(l)^{(1)} & B(l)^{(1)} \\ C(l)^{(1)} & D(l)^{(1)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} e^{\int_0^l \gamma(x) dx} & -\int_0^l \gamma(x) dx \int_0^l N(x) e^{2 \int_x^l \gamma(x) dx} dx \\ \int_0^l N(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx & e^{-\int_0^l \gamma(x) dx} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} \int_0^l N(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx & -2 \int_0^l \gamma(x) dx \\ \int_0^l N(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx & e^{-\int_0^l \gamma(x) dx} \end{array} \right], \quad (1.201)$$

откуда можно определить также соответствующую матрицу рассеяния:

$$[S] \cong \left[\begin{array}{ccc} \int_0^l N(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx & -\int_0^l \gamma(x) dx & e^{-\int_0^l \gamma(x) dx} \\ -\int_0^l \gamma(x) dx & \int_0^l N(x) e^{-\int_x^l \gamma(x) dx} dx & -2 \int_0^l \gamma(x) dx \end{array} \right]. \quad (1.202)$$

Мажорантные ряды для элементов матрицы $[T]$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A_M = D_M &= 1 + \frac{(Ml)^3}{2!} + \frac{(Ml)^4}{4!} + \dots = \operatorname{ch} Ml, \\ C_M = B_M &= Ml + \frac{(Ml)^3}{3!} + \frac{(Ml)^5}{5!} + \dots = \operatorname{sh} Ml, \end{aligned} \right\} \quad (1.203)$$

где

$$M \geq |N(x)|, \quad (1.204)$$

откуда следуют оценки приближений.

Например, для приближения в виде (1.201) имеем

$$\begin{aligned} \Delta A &< \operatorname{ch} Ml - 1; & \Delta B &< \operatorname{sh} Ml - Ml; \\ \Delta C &< \operatorname{sh} Ml - Ml; & \Delta D &< \operatorname{ch} Ml - 1. \end{aligned} \quad (1.205)$$

Коэффициент отражения на входе неоднородной линии в соответствии с (1.42) определяется формулой

$$\Gamma(x) = \frac{C(x) + D(x)\Gamma_n}{A(x) + B(x)\Gamma_n}, \quad (1.206)$$

где Γ_n — коэффициент отражения от нагрузки, а $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $D(x)$ определяются из решения уравнений (1.200) методом итераций.

Дифференциальное уравнение для Γ имеет вид уравнения Риккати:

$$\frac{d\Gamma}{dx} + 2\Gamma + N\Gamma^2 - N = 0. \quad (1.207)$$

и его приближенное решение [14] идентично элементу S_{11} матрицы (1.202). Таким образом, решение интегральных уравнений (1.200) определяет одновременно решение уравнения Риккати (1.207); указанное решение имеет форму (1.206).

Таблица I.1

$T_0(x) = 1;$
$T_1(x) = x;$
$T_2(x) = 2x^2 - 1;$
$T_3(x) = 4x^3 - 3x;$
$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1;$
$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x;$
$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1;$
$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x;$
$T_8(x) = 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1;$
$T_9(x) = 256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x;$
$T_{10}(x) = 512x^{10} - 1280x^8 + 1120x^6 - 400x^4 + 50x^2 - 1;$
$T_{11}(x) = 1024x^{11} - 2816x^9 + 2816x^7 - 1232x^5 + 220x^3 - 11x;$
$T_{12}(x) = 2048x^{12} - 6144x^{10} + 6912x^8 - 3584x^6 + 840x^4 - 72x^2 + 1;$
$T_{13}(x) = 4096x^{13} - 13312x^{11} + 16640x^9 - 9984x^7 + 2912x^5 - 364x^3 + 13x;$
$T_{14}(x) = 8192x^{14} - 28672x^{12} + 39424x^{10} - 26880x^8 + 9408x^6 - 1568x^4 + 98x^2 - 1;$

$$\begin{aligned} T_{15}(x) &= 16384x^{15} - 61440x^{13} + 92160x^{11} - 70400x^9 + 28800x^7 - \\ &\quad - 6048x^5 + 560x^3 - 15x; \\ T_{16}(x) &= 32768x^{16} - 131072x^{14} + 212992x^{12} - 180224x^{10} + \\ &\quad + 84480x^8 - 21504x^6 + 2688x^4 - 128x^2 + 1; \\ T_{17}(x) &= 65536x^{17} - 278528x^{15} + 487424x^{13} - 452608x^{11} + \\ &\quad + 239360x^9 - 71808x^7 + 11424x^5 - 816x^3 + 17x; \\ T_{18}(x) &= 131072x^{18} - 589824x^{16} + 1105920x^{14} - 1118208x^{12} + \\ &\quad + 658944x^{10} - 228096x^8 + 44352x^6 - 4320x^4 + 162x^2 - 1; \\ T_{19}(x) &= 262144x^{19} - 1245184x^{17} + 2490368x^{15} - 2723840x^{13} + \\ &\quad + 1770496x^{11} - 695552x^9 + 160512x^7 - 20064x^5 + \\ &\quad + 1140x^3 - 19x; \\ T_{20}(x) &= 524288x^{20} - 2621440x^{18} + 5570560x^{16} - 6553600x^{14} + \\ &\quad + 4659200x^{12} - 2050048x^{10} + 549120x^8 - 84480x^6 + \\ &\quad + 6600x^4 - 200x^2 + 1; \\ T_{21}(x) &= 1048576x^{21} - 5505024x^{19} + 12386304x^{17} - 15597568x^{15} + \\ &\quad + 12042240x^{13} - 5870592x^{11} + 1793792x^9 - 329472x^7 + \\ &\quad + 33264x^5 - 1540x^3 - 21x. \end{aligned}$$

Рекуррентное соотношение

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x).$$

Таблица I.2

$U_0(x) = 1;$
$U_1(x) = 2x;$
$U_2(x) = 4x^2 - 1;$
$U_3(x) = 8x^3 - 4x;$
$U_4(x) = 16x^4 - 12x^2 + 1;$
$U_5(x) = 32x^5 - 32x^3 + 6x;$
$U_6(x) = 64x^6 - 80x^4 + 24x^2 - 1;$
$U_7(x) = 128x^7 - 192x^5 + 80x^3 - 8x;$
$U_8(x) = 256x^8 - 448x^6 + 240x^4 - 40x^2 + 1;$
$U_9(x) = 512x^9 - 1024x^7 + 672x^5 - 160x^3 + 10x;$
$U_{10}(x) = 1024x^{10} - 2304x^8 + 1792x^6 - 540x^4 + 60x^2 - 1;$
$U_{11}(x) = 2048x^{11} - 5120x^9 + 4608x^7 - 1792x^5 + 280x^3 - 12x;$
$U_{12}(x) = 4096x^{12} - 11264x^{10} + 11520x^8 - 5376x^6 + 1120x^4 - 84x^2 + 1;$
$U_{13}(x) = 8192x^{13} - 24576x^{11} + 28160x^9 - 15360x^7 + 4032x^5 - 448x^3 + 14x;$
$U_{14}(x) = 16384x^{14} - 53248x^{12} + 67584x^{10} - 42240x^8 + 13440x^6 - 2016x^4 + 112x^2 - 1;$
$U_{15}(x) = 32768x^{15} - 114688x^{13} + 159744x^{11} - 112640x^9 + 42240x^7 - 8064x^5 + 672x^3 - 16x;$
$U_{16}(x) = 65536x^{16} - 245760x^{14} + 372736x^{12} - 292864x^{10} + 126720x^8 - 29568x^6 + 3360x^4 - 144x^2 + 1;$
$U_{17}(x) = 131072x^{17} - 524288x^{15} + 860160x^{13} - 745472x^{11} + 366080x^9 - 101376x^7 + 14784x^5 - 960x^3 + 18x;$
$U_{18}(x) = 262144x^{18} - 1114112x^{16} + 1966080x^{14} - 1863680x^{12} + 1025024x^{10} - 329472x^8 + 59136x^6 - 5280x^4 + 180x^2 - 1;$
$U_{19}(x) = 524288x^{19} - 2359296x^{17} + 4456448x^{15} - 4587520x^{13} + 2795520x^{11} - 1025024x^9 + 219648x^7 - 25344x^5 + 1320x^3 - 20x;$
$U_{20}(x) = 1048576x^{20} - 4980736x^{18} + 10027008x^{16} - 11141120x^{14} + 7454720x^{12} - 3075072x^{10} + 768768x^8 - 109824x^6 + 7920x^4 - 220x^2 + 1.$

Рекуррентное отношение

$$U_n(x) = 2xU_{n-1}(x) - U_{n-2}(x).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев И. И. Основы линейной алгебры. ОГИЗ. 1948.
2. Зелях Э. В. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд-во АН СССР, 1951.
3. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. Изд-во «Связь», 1965.
4. Гарновский Н. Н. Теоретические основы электропроводной связи, ч. I. Связьиздат, 1956.
5. Акульшин П. К., Кошев И. А., Кульбакий К. Е. Теория связи по проводам. Связьиздат, 1940.
6. Зелях Э. В. Идеальный преобразователь мощности — новый элемент электрической схемы. «Электросвязь», 1957, № 1.
7. Явич Л. Р. Волновые матрицы четырехполюсника. «Радиотехника и электроника», 1957, т. 2, № 7.
8. Heller G. S. Ferrites as Microwave Circuits Elements. PIRE, 1956, V. 44, № 10.
9. Гончаров В. А. Теория интерполяции и приближения функций. Гостехиздат, 1954.
10. Tables of Chebyshev Polynomials $S_n(x)$ and $C_n(x)$. National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 9, Washington, 1952.
11. Заездный А. М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. Госэнергоиздат, 1961.
12. Фельдштейн А. Л. Неоднородные линии. «Радиотехника», 1951, т. 6, № 5.
13. Литвиненко О. Н., Сошников В. И. Теория неоднородных линий и ее применение в радиотехнике. Изд-во «Советское радио», 1964.
14. Bolinder F. Fourier Transforms in the Theory on Inhomogeneous Transmission Lines. PIRE, 1950, November, v. 38.
15. Белецкий А. Ф. Теоретические основы электропроводной связи, ч. III. Связьиздат, 1959.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Восьмиполюсником называется электрическое устройство, имеющее восемь зажимов (полюсов). Ниже рассматриваются восьмиполюсники, у которых полюса используются попарно и разделены на две группы — левую и правую. В каждой группе по две пары полюсов (рис. 2.1).

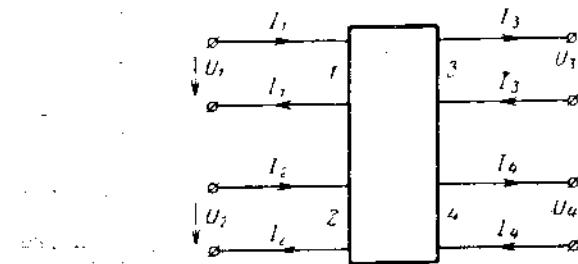


Рис. 2.1. Токи и напряжения на зажимах восьмиполюсника.

Прямой и обратный токи в парах полюсов равны и направлены так, как показано на рис. 2.1. К любой паре могут быть подключены источники и потребители энергии.

Согласно принятой в теории цепей классификации [1], восьмиполюсники (рис. 2.1) являются частным случаем $4m$ -полюсников ($m = 2$ — число пар полюсов в левой и правой группах).

Направление падающих и отраженных волн напряжения при волновом трактовке явлений дано на рис. 2.2, где p_1, p_2, p_3, p_4 — волновые сопротивления подводящих линий.

Линейными называются восьмиполюсники, в которых токи и напряжения (волны токов и напряжений) связаны между собой линейными зависимостями.

Наибольшее распространение получили следующие виды линейных соотношений (4×2)-полюсника:

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = z_{11} I_1 + z_{12} I_2 + z_{13} I_3 + z_{14} I_4, \\ U_2 = z_{21} I_1 + z_{22} I_2 + z_{23} I_3 + z_{24} I_4, \\ U_3 = z_{31} I_1 + z_{32} I_2 + z_{33} I_3 + z_{34} I_4, \\ U_4 = z_{41} I_1 + z_{42} I_2 + z_{43} I_3 + z_{44} I_4; \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = y_{11} U_1 + y_{12} U_2 + y_{13} U_3 + y_{14} U_4, \\ I_2 = y_{21} U_1 + y_{22} U_2 + y_{23} U_3 + y_{24} U_4, \\ I_3 = y_{31} U_1 + y_{32} U_2 + y_{33} U_3 + y_{34} U_4, \\ I_4 = y_{41} U_1 + y_{42} U_2 + y_{43} U_3 + y_{44} U_4. \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = a_{11} U_3 + a_{12} U_4 + a_{13} I_3 + a_{14} I_4, \\ U_2 = a_{21} U_3 + a_{22} U_4 + a_{23} I_3 + a_{24} I_4, \\ I_1 = a_{31} U_3 + a_{32} U_4 + a_{33} I_3 + a_{34} I_4, \\ I_2 = a_{41} U_3 + a_{42} U_4 + a_{43} I_3 + a_{44} I_4; \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{1\text{пад}} = t_{11} U_{3\text{пад}} + t_{12} U_{4\text{пад}} + t_{13} U_{3\text{отр}} + t_{14} U_{4\text{отр}}, \\ U_{2\text{пад}} = t_{21} U_{3\text{пад}} + t_{22} U_{4\text{пад}} + t_{23} U_{3\text{отр}} + t_{24} U_{4\text{отр}}, \\ U_{1\text{отр}} = t_{31} U_{3\text{пад}} + t_{32} U_{4\text{пад}} + t_{33} U_{3\text{отр}} + t_{34} U_{4\text{отр}}, \\ U_{2\text{отр}} = t_{41} U_{3\text{пад}} + t_{42} U_{4\text{пад}} + t_{43} U_{3\text{отр}} + t_{44} U_{4\text{отр}}; \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{1\text{отр}} = s_{11} U_{1\text{пад}} + s_{12} U_{2\text{пад}} + s_{13} U_{3\text{отр}} + s_{14} U_{4\text{отр}}, \\ U_{2\text{отр}} = s_{21} U_{1\text{пад}} + s_{22} U_{2\text{пад}} + s_{23} U_{3\text{отр}} + s_{24} U_{4\text{отр}}, \\ U_{3\text{пад}} = s_{31} U_{1\text{пад}} + s_{32} U_{2\text{пад}} + s_{33} U_{3\text{отр}} + s_{34} U_{4\text{отр}}, \\ U_{4\text{пад}} = s_{41} U_{1\text{пад}} + s_{42} U_{2\text{пад}} + s_{43} U_{3\text{отр}} + s_{44} U_{4\text{отр}}. \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Здесь $U_1, U_2, U_3, U_4, I_1, I_2, I_3, I_4$ — соответственно напряжения и токи на парах полюсов (рис. 2.1);

$U_{1\text{пад}}, U_{1\text{отр}}, U_{2\text{пад}}, U_{2\text{отр}}, U_{3\text{пад}}, U_{3\text{отр}}, U_{4\text{пад}}, U_{4\text{отр}}$ — падающие и отраженные волны напряжения у каждой пары полюсов (рис. 2.2);

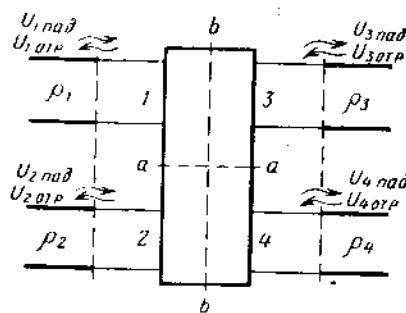


Рис. 2.2. Падающие и отраженные волны на зажимах восьмиполюсника.

$$\left. \begin{array}{l} U_i = U_{i\text{пад}} + U_{i\text{отр}}, \\ I_i = \frac{1}{p_i} (U_{i\text{пад}} - U_{i\text{отр}}), \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

где $i = 1, 2, 3$ и 4 .

Коэффициенты уравнений (2.1) — (2.5) записываются в виде матриц. Названия матриц такие же, как у четырехполюсников. Матрицы делятся на матрицы-клетки, о которых речь пойдет ниже (см. § 2.11):

$$[a] = \left[\begin{array}{cc|cc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \hline a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} [a_{aa}] & [a_{ab}] \\ [a_{ba}] & [a_{bb}] \end{array} \right], \quad (2.7)$$

$[a]$ — матрица передачи.

$$[z] = \left[\begin{array}{cc|cc} z_{11} & z_{13} & z_{13} & z_{14} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ \hline z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} [z_{aa}] & [z_{ab}] \\ [z_{ba}] & [z_{bb}] \end{array} \right], \quad (2.8)$$

$[z]$ — матрица сопротивлений.

$$[y] = \left[\begin{array}{cc|cc} y_{11} & y_{13} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ \hline y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} [y_{aa}] & [y_{ab}] \\ [y_{ba}] & [y_{bb}] \end{array} \right], \quad (2.9)$$

$[y]$ — матрица проводимостей.

$$[t] = \left[\begin{array}{cc|cc} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ \hline t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} [t_{aa}] & [t_{ab}] \\ [t_{ba}] & [t_{bb}] \end{array} \right], \quad (2.10)$$

$[t]$ — ненормированная волновая матрица передачи.

$$[s] = \left[\begin{array}{cc|cc} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ \hline s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} [s_{aa}] & [s_{ab}] \\ [s_{ba}] & [s_{bb}] \end{array} \right], \quad (2.11)$$

$[s]$ — ненормированная матрица рассеяния.

Волновые матрицы передачи $[t]$ и рассеяния $[s]$ описывают процессы в восьмиполюснике, включенном между подводящими линиями с волновыми сопротивлениями ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 (рис. 2.2). Все приведенные ниже соотношения справедливы также для случая, когда восьмиполюсник включен между активными сопротивлениями p_1 , p_2 , p_3 , p_4 (рис. 2.3).

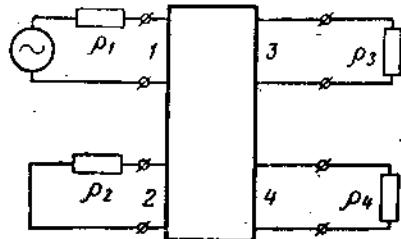


Рис. 2.3. Включение восьмиполюсника между активными сопротивлениями.

2.2. НОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦ

Нормирование дает определенные преимущества при использовании матричных уравнений на СВЧ (упрощаются конечные соотношения, применяются приведенные сопротивления и проводимости).

В уравнениях (2.1) — (2.5) изменим величины напряжений, токов, волн напряжений и соответствующих элементов матриц таким образом, чтобы не нарушились равенства. По аналогии с тем, как это делалось в теории четырехполюсников (см. § 1.3), получаем связь между нормированными и ненормированными величинами

$$U_q^H = \frac{U_q}{\sqrt{\rho_q}}; \quad I_q^H = I_q \sqrt{\rho_q}; \quad (2.12)$$

$$U_{q \text{ пад}}^H = \frac{U_{q \text{ пад}}}{\sqrt{\rho_q}}; \quad U_{q \text{ отр}}^H = \frac{U_{q \text{ отр}}}{\sqrt{\rho_q}}, \quad (2.13)$$

где $q = 1, 2, 3$ и 4 .

Величины U_q^H , I_q^H , $U_{q \text{ пад}}^H$, $U_{q \text{ отр}}^H$, имеющие размерность корня квадратного из мощности, называются нормированными напряжениями, токами и волнами напряжений.

Нормированные матрицы восьмиполюсника обозначаются прописными буквами алфавита

$[A]$; $[Z]$; $[Y]$; $[T]$; $[S]$

в отличие от ненормированных матриц, обозначаемых строчными буквами

$[a]$; $[z]$; $[y]$; $[t]$; $[s]$.

Связь между элементами нормированных и ненормированных матриц определяется равенствами

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_1}} & a_{12} \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_1}} & \frac{a_{13}}{\sqrt{\rho_1 \rho_3}} & \frac{a_{14}}{\sqrt{\rho_1 \rho_4}} \\ a_{21} \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} & a_{22} \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_2}} & \frac{a_{23}}{\sqrt{\rho_2 \rho_3}} & \frac{a_{24}}{\sqrt{\rho_2 \rho_4}} \\ a_{31} \sqrt{\rho_1 \rho_3} & a_{32} \sqrt{\rho_1 \rho_4} & a_{33} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_3}} & a_{34} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_4}} \\ a_{41} \sqrt{\rho_2 \rho_3} & a_{42} \sqrt{\rho_2 \rho_4} & a_{43} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_3}} & a_{44} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_4}} \end{bmatrix}; \quad (2.14)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{\rho_1} & \frac{z_{12}}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} & \frac{z_{13}}{\sqrt{\rho_1 \rho_3}} & \frac{z_{14}}{\sqrt{\rho_1 \rho_4}} \\ \frac{z_{21}}{\sqrt{\rho_2 \rho_1}} & \frac{z_{22}}{\rho_2} & \frac{z_{23}}{\sqrt{\rho_2 \rho_3}} & \frac{z_{24}}{\sqrt{\rho_2 \rho_4}} \\ \frac{z_{31}}{\sqrt{\rho_3 \rho_1}} & \frac{z_{32}}{\sqrt{\rho_3 \rho_2}} & \frac{z_{33}}{\rho_3} & \frac{z_{34}}{\sqrt{\rho_3 \rho_4}} \\ \frac{z_{41}}{\sqrt{\rho_4 \rho_1}} & \frac{z_{42}}{\sqrt{\rho_4 \rho_2}} & \frac{z_{43}}{\sqrt{\rho_4 \rho_3}} & \frac{z_{44}}{\rho_4} \end{bmatrix}; \quad (2.15)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} \rho_1 & y_{12} \sqrt{\rho_1 \rho_2} & y_{13} \sqrt{\rho_1 \rho_3} & y_{14} \sqrt{\rho_1 \rho_4} \\ y_{21} \sqrt{\rho_2 \rho_1} & y_{22} \rho_2 & y_{23} \sqrt{\rho_2 \rho_3} & y_{24} \sqrt{\rho_2 \rho_4} \\ y_{31} \sqrt{\rho_3 \rho_1} & y_{32} \sqrt{\rho_3 \rho_2} & y_{33} \rho_3 & y_{34} \sqrt{\rho_3 \rho_4} \\ y_{41} \sqrt{\rho_4 \rho_1} & y_{42} \sqrt{\rho_4 \rho_2} & y_{43} \sqrt{\rho_4 \rho_3} & y_{44} \rho_4 \end{bmatrix}; \quad (2.16)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_1}} t_{11} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_1}} t_{12} & \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_1}} t_{13} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_1}} t_{14} \\ \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} t_{21} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_2}} t_{22} & \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} t_{23} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_2}} t_{24} \\ \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_1}} t_{31} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_1}} t_{32} & \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_1}} t_{33} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_1}} t_{34} \\ \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} t_{41} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_2}} t_{42} & \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} t_{43} & \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_2}} t_{44} \end{bmatrix}; \quad (2.17)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} & s_{13} \sqrt{\frac{p_3}{p_1}} & s_{14} \sqrt{\frac{p_4}{p_1}} \\ s_{21} \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} & s_{22} & s_{23} \sqrt{\frac{p_3}{p_2}} & s_{24} \sqrt{\frac{p_4}{p_2}} \\ s_{31} \sqrt{\frac{p_1}{p_3}} & s_{32} \sqrt{\frac{p_2}{p_3}} & s_{33} & s_{34} \sqrt{\frac{p_4}{p_3}} \\ s_{41} \sqrt{\frac{p_1}{p_4}} & s_{42} \sqrt{\frac{p_2}{p_4}} & s_{43} \sqrt{\frac{p_3}{p_4}} & s_{44} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Волновые матрицы $[T]$ и $[S]$ в большинстве случаев применяются в нормированном виде.

2.3. СОЕДИНЕНИЯ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ

Наибольшее распространение на СВЧ получили каскадные соединения восьмиполюсников (рис. 2.4). При каскадном соединении восьмиполюсников их матрицы передачи $[a]$, $[A]$, $[t]$ и $[T]$ пере-

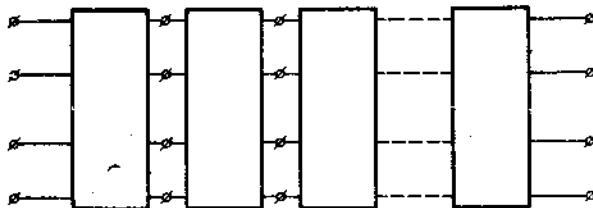


Рис. 2.4. Каскадное соединение восьмиполюсников.

множаются. Например, $[a]$ каскадного соединения k восьмиполюсников равна произведению k матриц отдельных восьмиполюсников $[a] = \prod_{i=1}^k [a]_i$. Соответственно $[T] = \prod_{i=1}^k [T]_i$. Перемножение матриц осуществляется по правилу «строка на столбец».

При каскадном соединении одинаковых восьмиполюсников матрицы передачи восьмиполюсников возводятся в степень, соответствующую числу каскадов. Общие методы возведения квадратных матриц в степень даны в [2]. В частном случае, если каскадное соединение состоит из идеально направленных и согласованных восьмиполюсников, то формулы для возведения матрицы в степень можно получить в замкнутом виде [3].

Другие способы соединений восьмиполюсников описаны в [2].

2.4. ОБРАТИМЫЕ (ВЗАЙМНЫЕ) ВОСЬМИПОЛЮСНИКИ

Обратимые восьмиполюсники подчиняются принципу взаимности (см. также § 1.7), из которого следуют равенства:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} a_{33} + a_{21} a_{43} - a_{13} a_{31} - a_{23} a_{41} &= 1, \\ a_{12} a_{34} + a_{22} a_{44} - a_{14} a_{32} - a_{24} a_{42} &= 1, \\ a_{11} a_{34} + a_{21} a_{41} - a_{14} a_{31} - a_{24} a_{41} &= 0, \\ a_{12} a_{33} + a_{22} a_{43} - a_{13} a_{32} - a_{23} a_{42} &= 0, \\ a_{13} a_{34} + a_{23} a_{44} - a_{14} a_{33} - a_{24} a_{43} &= 0, \\ a_{12} a_{31} + a_{22} a_{41} - a_{11} a_{32} - a_{21} a_{42} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

$$\left. \begin{aligned} z_{12} = z_{21}; \quad z_{13} = -z_{31}; \quad z_{14} = -z_{41}, \\ z_{23} = -z_{32}; \quad z_{24} = -z_{42}; \quad z_{34} = z_{43}; \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{12} = y_{21}; \quad y_{13} = -y_{31}; \quad y_{14} = -y_{41}, \\ y_{23} = -y_{32}; \quad y_{24} = -y_{42}; \quad y_{34} = y_{43}; \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{12} = S_{21}; \quad S_{13} = S_{31}; \quad S_{14} = S_{41}, \\ S_{23} = S_{32}; \quad S_{24} = S_{42}; \quad S_{34} = S_{43}; \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} T_{33} + T_{12} T_{34} - T_{13} T_{31} - T_{14} T_{32} &= 1, \\ T_{21} T_{43} + T_{22} T_{44} - T_{23} T_{41} - T_{24} T_{42} &= 1, \\ T_{11} T_{43} + T_{12} T_{44} - T_{13} T_{41} - T_{14} T_{43} &= 0, \\ T_{21} T_{33} + T_{22} T_{34} - T_{23} T_{31} - T_{24} T_{32} &= 0, \\ T_{31} T_{43} + T_{32} T_{44} - T_{33} T_{41} - T_{34} T_{42} &= 0, \\ T_{13} T_{21} + T_{14} T_{22} - T_{11} T_{23} - T_{12} T_{24} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

2.5. РЕАКТИВНОСТЬ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ

Матрица рассеяния восьмиполюсника, составленного из чисто реактивных элементов, удовлетворяет условию упитарности

$$[S] [\bar{S}]_t = [1] \quad (2.24)$$

[см. аналогичное уравнение (1.51)].

В развернутом виде последнее соотношение записывается как система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} |S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 &= 1, \\ |S_{21}|^2 + |S_{22}|^2 + |S_{23}|^2 + |S_{24}|^2 &= 1, \\ |S_{31}|^2 + |S_{32}|^2 + |S_{33}|^2 + |S_{34}|^2 &= 1, \\ |S_{41}|^2 + |S_{42}|^2 + |S_{43}|^2 + |S_{44}|^2 &= 1; \\ S_{11}S_{12}^* + S_{12}S_{22}^* + S_{13}S_{32}^* + S_{14}S_{42}^* &= 0, \\ S_{11}S_{13}^* + S_{12}S_{23}^* + S_{13}S_{33}^* + S_{14}S_{43}^* &= 0, \\ S_{11}S_{14}^* + S_{12}S_{24}^* + S_{13}S_{34}^* + S_{14}S_{44}^* &= 0, \\ S_{21}S_{13}^* + S_{22}S_{23}^* + S_{23}S_{33}^* + S_{24}S_{43}^* &= 0, \\ S_{21}S_{14}^* + S_{22}S_{24}^* + S_{23}S_{34}^* + S_{24}S_{44}^* &= 0, \\ S_{31}S_{14}^* + S_{32}S_{24}^* + S_{33}S_{34}^* + S_{34}S_{44}^* &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

2.6. СИММЕТРИЧНЫЕ ВОСЬМИПОЛЮСНИКИ

Если восьмиполюсник симметричен относительно вертикальной плоскости $b - b$ (рис. 2.2), то на элементы матрицы рассеяния накладываются условия

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= S_{33}; \quad S_{22} = S_{44}; \quad S_{12} = S_{34}; \quad S_{21} = S_{43}; \\ S_{13} &= S_{31}; \quad S_{14} = S_{32}; \quad S_{23} = S_{41}; \quad S_{24} = S_{42}. \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Условия симметрии восьмиполюсника относительно горизонтальной оси $a - a$ (рис. 2.2.) записываются в виде следующих равенств между элементами матрицы рассеяния

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= S_{22}; \quad S_{33} = S_{44}; \quad S_{12} = S_{21}; \quad S_{13} = S_{24}; \\ S_{14} &= S_{23}; \quad S_{31} = S_{42}; \quad S_{32} = S_{41}; \quad S_{34} = S_{43}. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Полностью симметричным называется восьмиполюсник, у которого условия симметрии выполняются как относительно вертикальной, так и относительно горизонтальной осей. При этом выполняются условия обратимости (2.22) и справедливы равенства

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= S_{22} = S_{33} = S_{44}; \\ S_{12} &= S_{34} = S_{21} = S_{43}; \\ S_{13} &= S_{24} = S_{31} = S_{42}, \\ S_{14} &= S_{23} = S_{41} = S_{32}. \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

2.7. НАПРАВЛЕННЫЕ ВОСЬМИПОЛЮСНИКИ

Восьмиполюсник называется идеально направленным, если при возбуждении какого-либо из его плеч одно из трех оставшихся плеч остается невозбужденным. Возможны три типа восьмиполюсников, удовлетворяющих этому условию (рис. 2.5):

$$\left. \begin{aligned} 1\text{-й тип: } S_{12} &= S_{21} = 0, \\ 2\text{-й тип: } S_{14} &= S_{41} = 0, \\ 3\text{-й тип: } S_{13} &= S_{31} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Первый и второй типы восьмиполюсников соответственно называются также «сонаправленным» и «противонаправленным» (рис. 2.5, а, б).

Дополнив (2.29) условиями полной симметрии (2.28) и унитарности (2.25), приходим к выводу, что

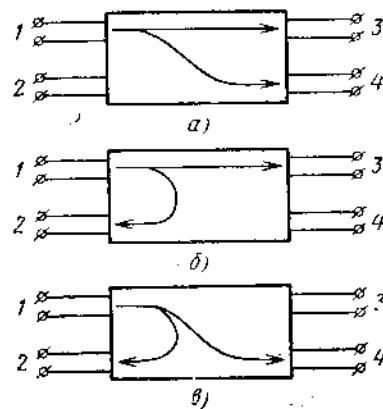


Рис. 2.5. Типы направленности восьмиполюсников.

$$\left. \begin{aligned} |S_{11}| &= |S_{22}| = |S_{33}| = |S_{44}| = 0; \\ \arg \frac{S_{13}}{S_{14}} &= \frac{\pi}{2} \quad (1\text{-й тип}), \\ \arg \frac{S_{13}}{S_{12}} &= \frac{\pi}{2} \quad (2\text{-й тип}), \\ \arg \frac{S_{14}}{S_{12}} &= \frac{\pi}{2} \quad (3\text{-й тип}). \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Идеально направленный, реактивный и полностью симметричный восьмиполюсник обладает следующими свойствами: а) все его плечи идеально согласованы, б) сдвиг фаз между напряжениями в выходных плечах составляет $\pi/2$.

2.8. СТРУКТУРА МАТРИЦ ИДЕАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО, РЕАКТИВНОГО И ПОЛНОСТЬЮ СИММЕТРИЧНОГО ВОСЬМИПОЛЮСНИКА

1-й тип

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{14} & S_{13} \\ \hline S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 & 0 \\ T_{12} & T_{11} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & T_{44} & T_{43} \\ 0 & 0 & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix}; \quad (2.31)$$

2-й тип

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{13} \\ \hline S_{13} & 0 & 0 & S_{12} \\ 0 & S_{13} & S_{12} & 0 \end{bmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} T_{11} & 0 & 0 & T_{14} \\ 0 & T_{11} & T_{14} & 0 \\ \hline 0 & T_{41} & T_{44} & 0 \\ T_{41} & 0 & 0 & T_{44} \end{bmatrix}; \quad (2.32)$$

3-й тип

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{14} & 0 \\ \hline 0 & S_{14} & 0 & S_{12} \\ S_{14} & 0 & S_{12} & 0 \end{bmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} 0 & T_{12} & T_{13} & 0 \\ T_{12} & 0 & 0 & T_{13} \\ \hline T_{42} & 0 & 0 & T_{43} \\ 0 & T_{42} & T_{43} & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

2.9. СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ РАЗЛИЧНЫХ МАТРИЦ

1. Связь между элементами матриц $[t]$ и $[a]$:

$$\left. \begin{aligned} t_{11} &= \frac{1}{2} \left(a_{11} + a_{31} p_1 + a_{13} \frac{1}{p_3} + a_{33} \frac{p_1}{p_3} \right), \\ t_{13} &= \frac{1}{2} \left(a_{11} + a_{31} p_1 - a_{13} \frac{1}{p_3} - a_{33} \frac{p_1}{p_3} \right), \\ t_{31} &= \frac{1}{2} \left(a_{11} - a_{31} p_1 + a_{13} \frac{1}{p_3} - a_{33} \frac{p_1}{p_3} \right), \\ t_{33} &= \frac{1}{2} \left(a_{11} - a_{31} p_1 - a_{13} \frac{1}{p_3} + a_{33} \frac{p_1}{p_3} \right), \\ t_{12} &= \frac{1}{2} \left(a_{12} + a_{32} p_1 + a_{14} \frac{1}{p_4} + a_{34} \frac{p_1}{p_4} \right), \\ t_{14} &= \frac{1}{2} \left(a_{12} + a_{32} p_1 - a_{14} \frac{1}{p_4} - a_{34} \frac{p_1}{p_4} \right), \\ t_{32} &= \frac{1}{2} \left(a_{12} - a_{32} p_1 + a_{14} \frac{1}{p_4} - a_{34} \frac{p_1}{p_4} \right), \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} t_{34} &= \frac{1}{2} \left(a_{12} - a_{32} p_1 - a_{14} \frac{1}{p_4} + a_{34} \frac{p_1}{p_4} \right), \\ t_{21} &= \frac{1}{2} \left(a_{21} + a_{41} p_2 + a_{23} \frac{1}{p_3} + a_{43} \frac{p_2}{p_3} \right), \\ t_{23} &= \frac{1}{2} \left(a_{21} + a_{41} p_2 - a_{23} \frac{1}{p_3} - a_{43} \frac{p_2}{p_3} \right), \\ t_{41} &= \frac{1}{2} \left(a_{21} - a_{41} p_2 + a_{23} \frac{1}{p_3} - a_{43} \frac{p_2}{p_3} \right), \\ t_{43} &= \frac{1}{2} \left(a_{21} - a_{41} p_2 - a_{23} \frac{1}{p_3} + a_{43} \frac{p_2}{p_3} \right), \\ t_{22} &= \frac{1}{2} \left(a_{22} + a_{42} p_2 + a_{24} \frac{1}{p_4} + a_{44} \frac{p_2}{p_4} \right), \\ t_{24} &= \frac{1}{2} \left(a_{22} + a_{42} p_2 - a_{24} \frac{1}{p_4} - a_{44} \frac{p_2}{p_4} \right), \\ t_{42} &= \frac{1}{2} \left(a_{22} - a_{42} p_2 + a_{24} \frac{1}{p_4} - a_{44} \frac{p_2}{p_4} \right), \\ t_{44} &= \frac{1}{2} \left(a_{22} - a_{42} p_2 - a_{24} \frac{1}{p_4} + a_{44} \frac{p_2}{p_4} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

2. Связь между элементами $[S]$ и $[T]$

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \frac{T_{21} T_{32} - T_{22} T_{31}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, & S_{12} &= \frac{T_{12} T_{31} - T_{11} T_{32}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, \\ S_{13} &= T_{31} S_{33} + T_{32} S_{43} + T_{33}, & S_{14} &= T_{31} S_{34} + T_{32} S_{44} + S_{34}, \\ S_{21} &= \frac{T_{21} T_{42} - T_{22} T_{41}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, & S_{22} &= \frac{T_{12} T_{41} - T_{11} T_{42}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, \\ S_{23} &= T_{41} S_{33} + T_{42} S_{43} + T_{43}, & S_{24} &= T_{41} S_{34} + T_{42} S_{44} + T_{44}, \\ S_{31} &= \frac{-T_{22}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, & S_{32} &= \frac{T_{12}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, \\ S_{33} &= \frac{T_{13} T_{22} - T_{12} T_{23}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, & S_{34} &= \frac{T_{14} T_{22} - T_{12} T_{24}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, \\ S_{41} &= \frac{T_{21}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, & S_{42} &= \frac{-T_{11}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, \\ S_{43} &= \frac{T_{11} T_{23} - T_{13} T_{21}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}, & S_{44} &= \frac{T_{11} T_{24} - T_{14} T_{21}}{T_{12} T_{21} - T_{11} T_{22}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Соответственно

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{-S_{42}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, & T_{12} &= \frac{S_{32}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, \\ T_{13} &= \frac{S_{42}S_{33} - S_{43}S_{32}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, & T_{14} &= \frac{S_{34}S_{42} - S_{32}S_{44}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, \\ T_{21} &= \frac{S_{41}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, & T_{22} &= \frac{-S_{31}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, \\ T_{23} &= \frac{S_{31}S_{43} - S_{33}S_{41}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, & T_{24} &= \frac{S_{31}S_{44} - S_{41}S_{34}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, \\ T_{31} &= \frac{S_{12}S_{41} - S_{11}S_{42}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, & T_{32} &= \frac{S_{11}S_{32} - S_{12}S_{31}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, \\ T_{33} &= T_{13}S_{11} + T_{23}S_{12} + S_{13}, & T_{34} &= T_{14}S_{11} + T_{24}S_{12} + S_{14}, \\ T_{41} &= \frac{S_{41}S_{22} - S_{21}S_{42}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, & T_{42} &= \frac{S_{21}S_{32} - S_{22}S_{31}}{S_{41}S_{32} - S_{42}S_{31}}, \\ T_{43} &= T_{13}S_{21} + T_{23}S_{22} + S_{23}, & T_{44} &= T_{14}S_{21} + T_{24}S_{22} + S_{24}. \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

2.10. АНАЛИЗ СИММЕТРИЧНЫХ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ МЕТОДОМ СИНФАЗНОГО И ПРОТИВОФАЗНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Анализ симметричных относительно горизонтальной плоскости восьмиполюсников облегчается при использовании суперпозиции параметров четырехполюсников двух типов.

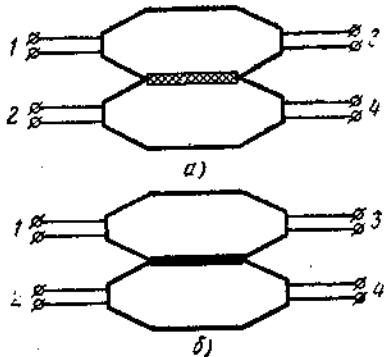


Рис. 2.6. К анализу симметричных восьмиполюсников:

a—синфазное возбуждение плеч 1 и 2;
б—противофазное возбуждение плеч 1 и 2.

Первый тип четырехполюсников образуется рассечением восьмиполюсника плоскостью из идеального магнетика, совпадающей

с плоскостью его симметрии (рис. 2.6, а) («синфазное возбуждение плеч 1 и 2»).

Полученный таким способом четырехполюсник описывается матрицей рассеяния

$$[S]^{++} = \begin{bmatrix} S_{11}^{++} & S_{12}^{++} \\ S_{21}^{++} & S_{22}^{++} \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Второй тип четырехполюсника образуется аналогичным рассечением плоскостью из идеального проводника (рис. 2.6, б) («противофазное возбуждение плеч 1 и 2»).

Такой четырехполюсник описывается матрицей

$$[S]^{+-} = \begin{bmatrix} S_{11}^{+-} & S_{12}^{+-} \\ S_{21}^{+-} & S_{22}^{+-} \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

Параметры восьмиполюсника определяются из равенств:

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{2} (S_{11}^{++} + S_{11}^{-+}), \\ S_{12} &= \frac{1}{2} (S_{11}^{+-} - S_{11}^{++}), \\ S_{13} &= \frac{1}{2} (S_{12}^{++} + S_{12}^{+-}), \\ S_{14} &= \frac{1}{2} (S_{12}^{+-} - S_{12}^{++}), \\ S_{33} &= \frac{1}{2} (S_{22}^{++} + S_{22}^{+-}), \\ S_{34} &= \frac{1}{2} (S_{22}^{+-} - S_{22}^{++}). \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

2.11. НЕКОТОРЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ КЛЕТОЧНЫМИ МАТРИЦАМИ

Приведенные выше связи между элементами различных матриц можно использовать для расчетов.

При исследованиях общего характера бывает удобной компактная запись, оперирующая с клеточными матрицами [см. (2.7) — (2.11)].

1. Связь между волновыми матрицами:

$$[T] = \begin{bmatrix} [S_{ba}]^{-1} & -[S_{ba}]^{-1}[S_{bb}] \\ [S_{aa}][S_{ba}]^{-1} & [S_{ab}] - [S_{aa}][S_{ba}]^{-1}[S_{bb}] \end{bmatrix}; \quad (2.40)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} [T_{ba}][T_{aa}]^{-1} & [T_{bb}] - [T_{ba}][T_{aa}]^{-1}[T_{ab}] \\ [T_{aa}]^{-1} & -[T_{aa}]^{-1}[T_{ab}] \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

2. Связь между матрицами $[T]$ и $[A]$:

$$[T] = \frac{1}{2} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \begin{bmatrix} [A_{aa}] + [A_{ab}] + [A_{ba}] + [A_{bb}] & [A_{aa}] - [A_{ab}] + [A_{ba}] - [A_{bb}] \\ [A_{aa}] + [A_{ab}] - [A_{ba}] - [A_{bb}] & [A_{aa}] - [A_{ab}] - [A_{ba}] + [A_{bb}] \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$[A] = \frac{1}{2} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \begin{bmatrix} [T_{aa}] + [T_{ba}] + [T_{ab}] + [T_{bb}] & [T_{aa}] + [T_{ba}] - [T_{ab}] - [T_{bb}] \\ [T_{aa}] - [T_{ba}] + [T_{ab}] - [T_{bb}] & [T_{aa}] - [T_{ba}] - [T_{ab}] + [T_{bb}] \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

3. Условие обратимости:

$$[z_{aa}] = [z_{aa}]_t; \quad [z_{ab}] = -[z_{ba}]_t; \quad [z_{bb}] = [z_{bb}]_t; \quad (2.44)$$

$$[y_{aa}] = [y_{aa}]_t; \quad [y_{ab}] = -[y_{ba}]_t; \quad [y_{bb}] = [y_{bb}]_t; \quad (2.45)$$

$$[S_{aa}] = [S_{aa}]_t; \quad [S_{ab}] = [S_{ba}]_t; \quad [S_{bb}] = [S_{bb}]_t. \quad (2.46)$$

4. Условие симметрии относительно оси bb (рис. 2.2):

$$[z_{aa}] = -[z_{bb}]; \quad [z_{ab}] = -[z_{ba}]; \quad (2.47)$$

$$[y_{aa}] = -[y_{bb}]; \quad [y_{ab}] = -[y_{ba}]; \quad (2.48)$$

$$[S_{aa}] = [S_{bb}]; \quad [S_{ab}] = [S_{ba}]. \quad (2.49)$$

Подробная таблица, охватывающая различные случаи симметрии, дана в работе [4].

2.12. МАТРИЦЫ НЕКОТОРЫХ ПРОСТЕЙШИХ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ

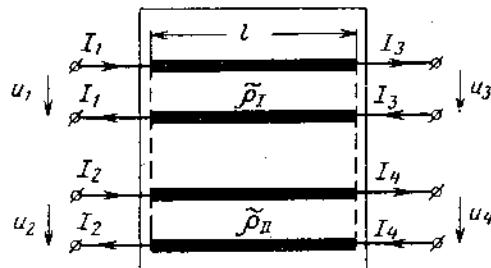


Рис. 2.7. Несвязанные линии.

1. Несвязанные линии (рис. 2.7):

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & j\tilde{\rho}_I \sin \theta & 0 \\ 0 & \cos \theta & 0 & j\tilde{\rho}_{II} \sin \theta \\ j\frac{\sin \theta}{\tilde{\rho}_I} & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & j\frac{\sin \theta}{\tilde{\rho}_{II}} & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.50)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j\tilde{\rho}_I \operatorname{ctg} \theta & 0 & j\tilde{\rho}_I \operatorname{csc} \theta & 0 \\ 0 & -j\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg} \theta & 0 & j\tilde{\rho}_{II} \operatorname{csc} \theta \\ -j\tilde{\rho}_I \operatorname{csc} \theta & 0 & j\tilde{\rho}_I \operatorname{ctg} \theta & 0 \\ 0 & -j\tilde{\rho}_{II} \operatorname{csc} \theta & 0 & j\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.51)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j\frac{1}{\tilde{\rho}_I} \operatorname{ctg} \theta & 0 & j\frac{1}{\tilde{\rho}_I} \operatorname{csc} \theta & 0 \\ 0 & -j\frac{1}{\tilde{\rho}_{II}} \operatorname{ctg} \theta & 0 & j\frac{1}{\tilde{\rho}_{II}} \operatorname{csc} \theta \\ -j\frac{1}{\tilde{\rho}_I} \operatorname{csc} \theta & 0 & j\frac{1}{\tilde{\rho}_I} \operatorname{ctg} \theta & 0 \\ 0 & -j\frac{1}{\tilde{\rho}_{II}} \operatorname{csc} \theta & 0 & j\frac{1}{\tilde{\rho}_{II}} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}. \quad (2.52)$$

Волновые матрицы для частного случая $\tilde{\rho}_I = \tilde{\rho}_{II} = \tilde{\rho}_0$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{-j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-j\theta} \\ e^{-j\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.53)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

где $0 = \frac{2\pi l}{A}$ — электрическая длина отрезков линий;

l — длина отрезков линий;

A — длина волны в линиях;

ρ_1, ρ_2 — волновые сопротивления первого и второго отрезка линий;

$\tilde{\rho}_0$ — волновое сопротивление подвешенных линий;

Знак \sim (тильда) означает «ненормированные».

2. Одинаковые связанные линии (рис. 2.8, а):

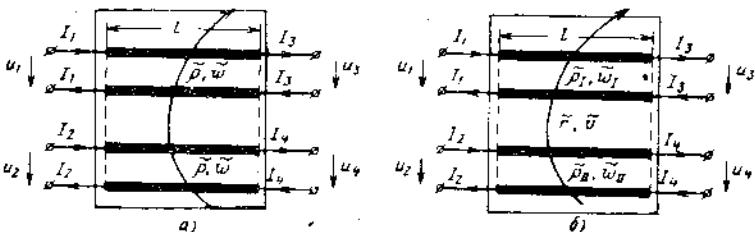


Рис. 2.8. а — одинаковые связанные линии; б — неодинаковые связанные линии.

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \tilde{\rho} \sin \theta & \tilde{r} \sin \theta \\ 0 & \cos \theta & \tilde{r} \sin \theta & \tilde{\rho} \sin \theta \\ \tilde{r} \sin \theta & -j \frac{\sin \theta}{v} & \cos \theta & 0 \\ -j \frac{\sin \theta}{v} & j \frac{\sin \theta}{\omega} & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.55)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j \tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta & -j \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & \tilde{\rho} \csc \theta & \tilde{r} \csc \theta \\ -j \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & -j \tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta & \tilde{r} \csc \theta & \tilde{\rho} \csc \theta \\ -j \tilde{\rho} \csc \theta & -j \tilde{r} \csc \theta & \tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta & \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta \\ -j \tilde{r} \csc \theta & -j \tilde{\rho} \csc \theta & \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & \tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.56)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\omega} & j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{v} & j \frac{\csc \theta}{\omega} & -j \frac{\csc \theta}{v} \\ j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{v} & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\omega} & -j \frac{\csc \theta}{v} & j \frac{\csc \theta}{\omega} \\ -j \frac{\csc \theta}{\omega} & j \frac{\csc \theta}{v} & j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\omega} & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{v} \\ j \frac{\csc \theta}{v} & -j \frac{\csc \theta}{\omega} & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{v} & j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\omega} \end{bmatrix}; \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} &= \frac{\left(r - \frac{1}{v}\right)^2 + \left[2 \operatorname{ctg} \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right)\right]^2}{\left(r - \frac{1}{v}\right)^2 + \left[2 \operatorname{ctg} \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right)\right]^2}, \\ S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} &= -2 \frac{-\left(\frac{\rho}{v} + \frac{r}{\omega}\right) + i \left(r + \frac{1}{v}\right) \operatorname{ctg} \theta}{\left(r - \frac{1}{v}\right)^2 + \left[2 \operatorname{ctg} \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right)\right]^2}, \\ S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} &= \frac{\csc \theta \left[2 \operatorname{ctg} \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right)\right]}{\left(r - \frac{1}{v}\right)^2 + \left[2 \operatorname{ctg} \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right)\right]^2}, \\ S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} &= \frac{-i \left(r - \frac{1}{v}\right) \csc \theta}{\left(r - \frac{1}{v}\right)^2 + \left[2 \operatorname{ctg} \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right)\right]^2}, \\ [T] &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right) \sin \theta & j \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta & -j \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta & -j \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta \\ j \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta & 2 \cos \theta + i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right) \sin \theta & -i \left(r + \frac{1}{v}\right) \sin \theta & -i \left(r + \frac{1}{v}\right) \sin \theta \\ -i \left(r + \frac{1}{v}\right) \sin \theta & -i \left(r + \frac{1}{v}\right) \sin \theta & 2 \cos \theta - i \left(\rho + \frac{1}{\omega}\right) \sin \theta & -i \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta \\ i \left(r + \frac{1}{v}\right) \sin \theta & i \left(r + \frac{1}{v}\right) \sin \theta & -i \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta & i \left(r - \frac{1}{v}\right) \sin \theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.58) \quad (2.59)$$

где $\theta = 2\pi \frac{l}{\Lambda}$;

l — длина отрезков связанных линий;

Λ — длина волны в линиях;

$\rho, \tilde{\rho}$ — неприведенные (ненормированные) волновые сопротивления;

\tilde{r}, \tilde{v} — неприведенные сопротивления связи.

Приведенные волновые сопротивления и сопротивления связи

$$\rho = \frac{\tilde{\rho} \cdot l}{\rho_0}; \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0};$$

$$v = \frac{\tilde{v} \cdot l}{\rho_0}; \quad r = \frac{\tilde{r}}{\tilde{v}};$$

$\tilde{\rho}$ — волновое сопротивление подводящих линий.

Приведенные выше матрицы относятся к обратимым связанным линиям, для которых

$$\begin{aligned} w &= \frac{\rho^2 - r^2}{\rho}; \\ v &= \frac{\rho^2 - r^2}{r}; \\ rv &= \rho w. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Более подробные сведения о связанных линиях даны в [5].

3. Неодинаковые связанные линии (рис. 2.8, б):

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & j\tilde{\rho}_1 \sin \theta & j\tilde{r} \sin \theta \\ 0 & \cos \theta & j\tilde{r} \sin \theta & j\tilde{\rho}_{II} \sin \theta \\ j\frac{\sin \theta}{\tilde{w}_I} & -j\frac{\sin \theta}{\tilde{v}} & \cos \theta & 0 \\ -j\frac{\sin \theta}{\tilde{v}} & j\frac{\sin \theta}{\tilde{w}_{II}} & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} [y] = & \begin{bmatrix} j\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg} \theta \\ j\frac{\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{w}_I - \tilde{r}^2} \\ -j\sin \theta \left(\frac{1}{\tilde{w}_I} - \frac{\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{r}^2 - \tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_{II}} \right) \\ j\sin \theta \left(\frac{1}{\tilde{v}} - \frac{\tilde{r} \operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{r}^2 - \tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_{II}} \right) \end{bmatrix} \\ S_{11} = S_{31} = S_{21} = S_{41} = & \frac{\tilde{r} \operatorname{ctg} \theta}{j\frac{\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg} \theta}{\tilde{r}^2 - \tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_{II}}} \quad ; \quad (2.62) \\ S_{12} = S_{32} = S_{22} = S_{42} = & \frac{j\sin \theta \left(\frac{1}{\tilde{v}} - \frac{\tilde{r} \operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{r}^2 - \tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_{II}} \right)}{j\frac{\tilde{\rho}_{II} \operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{w}_I - \tilde{r}^2} - j\frac{\tilde{\rho}_1 \operatorname{ctg} \theta}{\tilde{r}^2 - \tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_{II}}} \quad ; \quad (2.63) \\ S_{13} = S_{33} = S_{23} = S_{43} = & \frac{2 \left[2 \cos \theta + j \left(\rho_{II} + \frac{1}{\tilde{w}_{II}} \right) \sin \theta \right]}{-j^2 \left(r - \frac{1}{v} \right) \sin \theta} \quad ; \quad (2.64) \\ S_{14} = S_{34} = S_{24} = S_{44} = & \frac{\left(r - \frac{1}{v} \right)^2 \sin^2 \theta + \left[2 \cos \theta + j \left(\rho_I + \frac{1}{\tilde{w}_I} \right) \sin \theta \right] \left[2 \cos \theta + j \left(\rho_{II} + \frac{1}{\tilde{w}_{II}} \right) \sin \theta \right]}{\left[\left(r^2 - \frac{1}{v^2} \right) - \left(\rho_I + \frac{1}{\tilde{w}_I} \right) \left(\rho_{II} - \frac{1}{\tilde{w}_{II}} \right) \right] \sin^2 \theta + \left(\rho_{II} - \frac{1}{\tilde{w}_{II}} \right) \sin 2\theta} \quad ; \quad (2.65) \end{aligned}$$

$$S_{24} = S_{42} = \frac{2 \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta \right]}{\left(r - \frac{1}{v} \right)^2 \sin^2 \theta + \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta \right] \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_{II} + \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta \right]} ; \quad (2.66)$$

$$S_{11} = S_{33} = \frac{\left[\left(r^2 - \frac{1}{v^2} \right) - \left(\rho_I - \frac{1}{\omega_I} \right) \left(\rho_{II} + \frac{1}{\omega_{II}} \right) \right] \sin^2 \theta + i \left(\rho_I - \frac{1}{\omega_I} \right) \sin 2\theta}{\left(r - \frac{1}{v} \right)^2 \sin^2 \theta + \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta \right] \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_{II} + \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta \right]} ; \quad (2.67)$$

$$S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = \frac{\left[2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta \right] \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_{II} + \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta \right]}{\left(r - \frac{1}{v} \right)^2 \sin^2 \theta + \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta \right] \left[2 \cos \theta + i \left(\rho_{II} + \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta \right]} ; \quad (2.68)$$

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta & i \left(r - \frac{1}{v} \right) \sin \theta & -i \left(\rho_I - \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta & -i \left(r + \frac{1}{v} \right) \sin \theta \\ j \left(r - \frac{1}{v} \right) \sin \theta & 2 \cos \theta + i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta & -j \left(r + \frac{1}{v} \right) \sin \theta & -i \left(\rho_{II} - \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta \\ i \left(\rho_I - \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta & i \left(r + \frac{1}{v} \right) \sin \theta & 2 \cos \theta - i \left(\rho_I + \frac{1}{\omega_I} \right) \sin \theta & -j \left(r - \frac{1}{v} \right) \sin \theta \\ i \left(r + \frac{1}{v} \right) \sin \theta & i \left(\rho_{II} - \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta & -i \left(r - \frac{1}{v} \right) \sin \theta & 2 \cos \theta - j \left(\rho_{II} + \frac{1}{\omega_{II}} \right) \sin \theta \end{bmatrix} ; \quad (2.69)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} \frac{i \operatorname{ctg} \theta}{\tilde{\omega}_{II} \sigma} & \frac{i \operatorname{ctg} \theta}{\tilde{v} \sigma} & -i \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{\omega}_{II} \sigma} & -i \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{v} \sigma} \\ i \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{v} \sigma} & i \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{\omega}_I \sigma} & -i \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{v} \sigma} & -i \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{\omega}_I \sigma} \\ -j \xi \sin \theta & -j \delta \sin \theta & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{\omega}_{II} \sigma} & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{v} \sigma} \\ -j \delta \sin \theta & -j \tau \sin \theta & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{v} \sigma} & -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{\omega}_I \sigma} \end{bmatrix} ; \quad (2.70)$$

где $\sigma = \frac{1}{v^2} - \frac{1}{\tilde{\omega}_I \tilde{\omega}_{II}}$;

$\xi = \tilde{\rho}_I - \frac{\operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{\omega}_{II} \sigma}$;

$\tau = \tilde{\rho}_{II} - \frac{\operatorname{ctg}^2 \theta}{\tilde{\omega}_I \sigma}$;

$\delta = \tilde{r} - \frac{\operatorname{ctg}^2 \theta}{v \sigma}$.

Здесь

$$\tilde{\rho}_1 = \frac{\tilde{\rho}_I}{\rho_1}; \quad \tilde{\omega}_1 = \frac{\tilde{\omega}_I}{\rho_1}; \quad \tilde{\rho}_{II} = \frac{\tilde{\rho}_{II}}{\rho_2},$$

$$\tilde{\omega}_{II} = \frac{\tilde{\omega}_{II}}{\rho_2}; \quad \tilde{r} = \frac{\tilde{r}}{\sqrt{\tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_2}} \text{ и } \tilde{v} = \frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{\rho}_1 \tilde{\rho}_2}},$$

где знак «~» отмечает ненормированные параметры, а $\rho_1 = \rho_3$ и $\rho_2 = \rho_4$ — нагрузочные сопротивления в плечах 1 (3) и 2 (4) восьмиполюсника.

Соотношение взаимности для неодинаковых связанных линий имеет вид

$$\tilde{\rho}_{II} \tilde{\omega}_1 = \tilde{\rho}_1 \tilde{\omega}_{II} = \tilde{r} \tilde{v}.$$

Условие идеальной направленности системы: $\tilde{r} \tilde{v} = 1$.

Условие идеального согласования во всех плечах системы имеет вид

$$\tilde{\rho}_1 \tilde{\omega}_1 = \tilde{\rho}_{II} \tilde{\omega}_{II} = 1.$$

4. Однотактовые связанные линии с уравновешенной электрической и магнитной связью ($r\tilde{v} = \rho_0^2$ или $rv = 1$).

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & j\tilde{\rho} \sin \theta & j\tilde{r} \sin \theta \\ 0 & \cos \theta & j\tilde{r} \sin \theta & j\tilde{\rho} \sin \theta \\ j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \sin \theta & -j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \sin \theta & j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.71)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j\tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta & -j\tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & j\tilde{\rho} \operatorname{csc} \theta & j\tilde{r} \operatorname{csc} \theta \\ -j\tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & -j\tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta & j\tilde{r} \operatorname{csc} \theta & j\tilde{\rho} \operatorname{csc} \theta \\ -j\tilde{\rho} \operatorname{csc} \theta & -j\tilde{r} \operatorname{csc} \theta & j\tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta & j\tilde{r} \operatorname{ctg} \theta \\ -j\tilde{r} \operatorname{csc} \theta & -j\tilde{\rho} \operatorname{csc} \theta & j\tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & j\tilde{\rho} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.72)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta & j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta & j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta & -j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta \\ j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta & -j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta & -j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta & j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta \\ -j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta & j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta & j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta & -j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta \\ j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta & -j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{csc} \theta & -j\frac{\tilde{r}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta & j\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0^2} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.73)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r \sin \theta}{\cos \theta + j\rho \sin \theta} & 1 & 0 \\ \frac{r \sin \theta}{\cos \theta + j\rho \sin \theta} & 0 & 0 & \frac{1}{\cos \theta + j\rho \sin \theta} \\ 1 & 0 & \frac{r \sin \theta}{\cos \theta + j\rho \sin \theta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \theta + j\rho \sin \theta} & \frac{r \sin \theta}{\cos \theta + j\rho \sin \theta} & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.74)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta + j\rho \sin \theta & 0 & 0 & -jr \sin \theta \\ 0 & \cos \theta + j\rho \sin \theta & -jr \sin \theta & 0 \\ 0 & jr \sin \theta & \cos \theta - j\rho \sin \theta & 0 \\ jr \sin \theta & 0 & 0 & \cos \theta - j\rho \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (2.75)$$

Условия обратимости (2.60) для связанных линий с уравновешенной связью имеют вид

$$\text{или } \begin{cases} rv = \rho w = 1, \\ \rho^2 - r^2 = 1. \end{cases} \quad (2.76)$$

2.13. ВОЛНОВЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ЧЕТНОГО И НЕЧЕТНОГО ВИДОВ КОЛЕБАНИЙ В СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

При синфазном возбуждении обеих связанных линий в них возникают колебания четного вида. Структура поля для случая связанных симметричных полосковых линий показана на рис. 2.9.

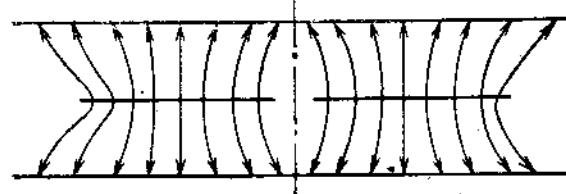


Рис. 2.9. Структура поля в связанный полосковой линии для четного вида колебаний.

Структура поля для колебаний нечетного вида (соответствующих противофазному возбуждению) в тех же полосковых линиях изображена на рис. 2.10.

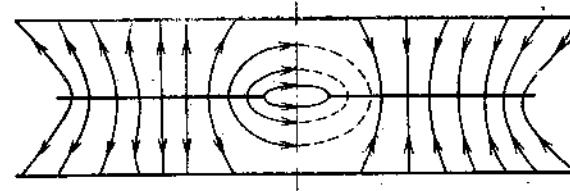


Рис. 2.10. Структура поля в связанный полосковой линии для нечетного вида колебаний.

Волновые сопротивления ρ_{++} и ρ_{+-} для колебаний четного и нечетного вида связаны с параметрами ρ и r соотношениями:

$$\rho = \frac{\rho_{++} + \rho_{+-}}{2}; \quad (2.77)$$

$$r = \frac{\rho_{++} - \rho_{+-}}{2}; \quad (2.78)$$

$$\rho_{++} = \rho + r; \quad (2.79)$$

$$\rho_{+-} = \rho - r; \quad (2.80)$$

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_{+-}} + \frac{1}{\rho_{++}} \right); \quad (2.81)$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_{+-}} - \frac{1}{\rho_{++}} \right). \quad (2.82)$$

2.14. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ, ПРОИЗВОДНЫЕ ОТ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ

Если в восьмиполюснике два плеча нагрузить некоторыми заданными сопротивлениями, то связь между напряжениями и токами в двух оставшихся плечах будет подчиняться уравнениям четырехполюсника (производного от восьмиполюсника).

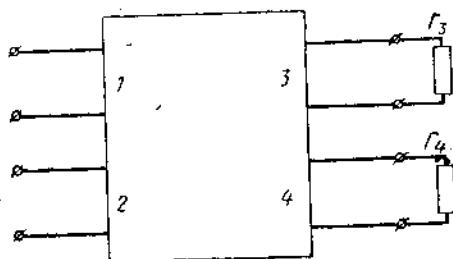


Рис. 2.11. Восьмиполюсник с нагруженными плечами 3 и 4.

Известны общие соотношения, содержащие элементы матрицы рассеяния [7], определяющие переход от многополюсника к производному четырехполюснику. Сущность этого метода перехода заключается в том, что, если к k -му плечу n -полюсника присоединить несогласованную нагрузку, то соответственно оставшимся $(n-1)$ плечам многополюсника получаем новую систему уравнений, определяющую матрицу $[S]$, в которой отсутствуют волны k -го плеча.

Матрица рассеяния многополюсника с нагрузкой в k -м плече упрощается за счет вычеркивания в полной матрице многополюсника k -й строки и k -го столбца.

Оставшиеся элементы матрицы приобретают новые значения, описываемые выражениями

$$S'_{ij} = S_{ij} + \frac{\Gamma_k S_{ik} S_{kj}}{1 - S_{kk} \Gamma_k}. \quad (2.83)$$

В том случае, когда нагрузка присоединяется еще к одному плечу m многополюсника, то в матрице рассеяния вычеркивается m -я строка и m -й столбец, а элементы матрицы определяются по рекуррентной формуле

$$S''_{ij} = S'_{ij} + \frac{\Gamma_m S'_{im} S'_{mj}}{1 - S'_{mm} \Gamma_m}. \quad (2.84)$$

Применение формул (2.83) и (2.84) поясняется на примере.

Пример. Известна матрица рассеяния обратимого восьмиполюсника. Требуется определить элементы матрицы рассеяния четырехполюсника с плечами 1 и 2, образованного из восьмиполюсника, нагрузки плеч 3 и 4 которого имеют коэффициенты отражения Γ_3 и Γ_4 (рис. 2.11).

Воспользуемся (2.83), полагая сначала, что нагружено лишь плечо 3. С учетом условия обратимости (2.22) элементы матрицы рассеяния шестиполюсника с плечами 1, 2 и 4 соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} S'_{11} &= S_{11} + \frac{S_{13}^2 \Gamma_3}{1 - S_{33} \Gamma_3}, \\ S'_{12} &= S'_{21} = S_{12} + \frac{S_{13} S_{23} \Gamma_3}{1 - S_{33} \Gamma_3}, \\ S'_{14} &= S'_{41} = S_{14} + \frac{S_{13} S_{34} \Gamma_3}{1 - S_{33} \Gamma_3}, \\ S'_{22} &= S_{22} + \frac{S_{23}^2 \Gamma_3}{1 - S_{33} \Gamma_3}, \\ S'_{24} &= S'_{42} = S_{24} + \frac{S_{23} S_{34} \Gamma_3}{1 - S_{33} \Gamma_3}, \\ S'_{44} &= S_{44} + \frac{S_{34}^2 \Gamma_3}{1 - S_{33} \Gamma_3}. \end{aligned} \right\} \quad (2.85)$$

Далее к плечу 4 подключается нагрузка с коэффициентом отражения Γ_4 . С помощью (2.84) находим искомые элементы матрицы рассеяния четырехполюсника:

$$\left. \begin{aligned} S''_{11} &= S'_{11} + \frac{(S'_{14})^2 \Gamma_4}{1 - S'_{44} \Gamma_4}, \\ S''_{12} &= S''_{21} = S'_{12} + \frac{S'_{14} S'_{42} \Gamma_4}{1 - \Gamma_4 S'_{44}}, \\ S''_{22} &= S'_{22} + \frac{(S'_{24})^2 \Gamma_4}{1 - \Gamma_4 S'_{44}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.86)$$

Подставляя (2.85) в (2.86), получаем окончательное решение задачи.

Большое практическое значение имеют случаи, когда неиспользованные плечи восьмиполюсника короткозамкнуты или разомкнуты (работают в режиме КЗ или ХХ). Элементы матриц производных четырехполюсников определяются наложением граничных условий:

$\Gamma_i = 1$ (i -е плечо работает в режиме холостого хода), $\Gamma_i = -1$ (i -е плечо работает в режиме короткого замыкания). При этом выражения (2.83) и (2.84) значительно упрощаются.

Существует другой способ определения элементов матриц производных четырехполюсников. Если часть плеч исходного восьмиполюсника работает в режимах ХХ или КЗ, то в уравнениях типа (2.1) — (2.3) соответствующие напряжения или токи полагают равными нулю. Получают уравнения исследуемых четырехполюсников, коэффициенты которых — элементы матриц.

Тот же способ применим для получения матриц четырехполюсников, образованных в результате соединения между собой двух плеч восьмиполюсника, токи в которых приравниваются.

Ниже табулируются матрицы некоторых типов производных четырехполюсников, полученных в результате использования различных способов включения связанных линий (для общего случая неуравновешенных связей).

Плечи 2 и 3 (или 1 и 4) работают в режиме КЗ (рис. 2.12):

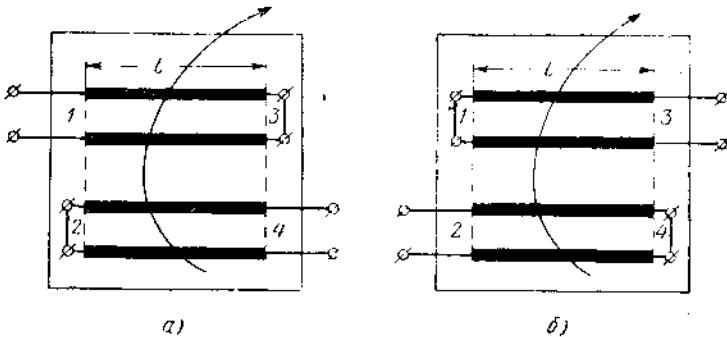


Рис. 2.12. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а — КЗ плеч 2 и 3; б — КЗ плеч 1 и 4.

$$[a] = \begin{bmatrix} -\frac{\tilde{\rho}}{r} \cos \theta & -i \frac{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{r}} \sin \theta \\ \frac{\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}{\tilde{r}} & -\frac{\tilde{\rho}}{r} \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.87)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} i \frac{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta \cos \theta}{\tilde{r} \left(\frac{\tilde{\rho}}{r} \cos^2 \theta - \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}} \right)} & i \frac{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta}{\tilde{r} \left(\frac{\tilde{\rho}}{r} \cos^2 \theta - \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}} \right)} \\ -i \frac{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta}{\tilde{r} \left(\frac{\tilde{\rho}}{r} \cos^2 \theta - \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}} \right)} & -i \frac{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta \cos \theta}{\tilde{r} \left(\frac{\tilde{\rho}}{r} \cos^2 \theta - \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}} \right)} \end{bmatrix}; \quad (2.88)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -i \frac{\tilde{\rho}}{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta & -i \frac{\tilde{r}}{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{csc} \theta \\ i \frac{\tilde{r}}{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{csc} \theta & i \frac{\tilde{\rho}}{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}. \quad (2.89)$$

Характеристические параметры ¹:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= \frac{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta}{\sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta}}, \\ \cos \beta &= -\frac{\tilde{\rho}}{\tilde{r}} \cos \theta; \end{aligned} \right\} \quad (2.90)$$

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{-\tilde{\rho} \cos \theta}{r} + i \frac{1}{2} \left\{ -\frac{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2}{r} \sin \theta + \frac{\csc \theta (\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2)}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) r} \right\}, \\ T_{12} &= i \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2}{r} \sin \theta + \frac{\csc \theta (\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2)}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) r} \right\}, \\ T_{21} &= -i \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2}{r} \sin \theta + \frac{\csc \theta (\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2)}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) r} \right\}, \\ T_{22} &= \frac{-\tilde{\rho} \cos \theta}{r} - i \frac{1}{2} \left\{ -\frac{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2}{r} \sin \theta + \frac{\csc \theta (\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2)}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) r} \right\}; \end{aligned} \quad (2.91)$$

$$[S] = \frac{1}{2 \tilde{\rho} \cos \theta + i \left\{ (\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta - \frac{\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta} \right\}} \times \begin{bmatrix} i \left\{ (\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta + \frac{\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta} \right\} & -2r \\ -2r & i \left\{ (\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta + \frac{\tilde{\rho}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}{(\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta} \right\} \end{bmatrix}. \quad (2.92)$$

Плечи 2 и 3 (или 1 и 4) работают в режиме ХХ (рис. 2.13):

$$[a] = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{\rho}}{r} \cos \theta & i \frac{\tilde{\rho}^2 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta}{\tilde{r} \sin \theta} \\ i \frac{\sin \theta}{\tilde{r}} & \frac{\tilde{\rho}}{r} \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.93)$$

¹ Здесь и в дальнейшем (см. § 1.12) $\cos \beta = \operatorname{ch} g$; $g = j\beta$.

$$[z] = \begin{bmatrix} -j\tilde{p} \operatorname{ctg} \theta & j\tilde{r} \operatorname{csc} \theta \\ -j\tilde{r} \operatorname{csc} \theta & j\tilde{p} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.94)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} j\frac{\tilde{p} \cos \theta \sin \theta}{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2} & -j\frac{\tilde{r} \sin \theta}{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2} \\ j\frac{\tilde{r} \sin \theta}{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2} & -j\frac{\tilde{p} \cos \theta \sin \theta}{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2} \end{bmatrix}. \quad (2.95)$$

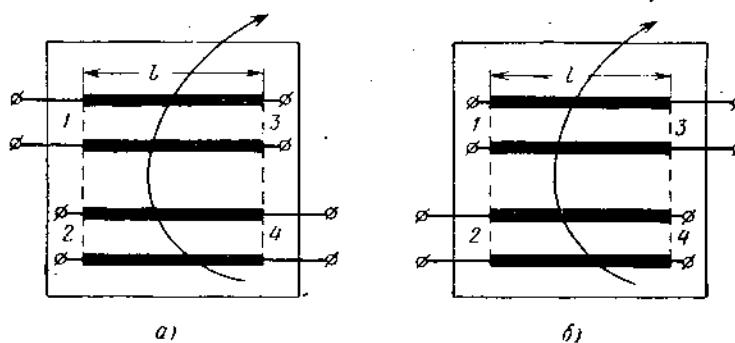


Рис. 2.13. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—ХХ плеч 2 и 3; б—ХХ плеч 1 и 4.

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= \frac{\sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2 \cos^2 \theta}}{\sin \theta}, \\ \cos \beta &\doteq \frac{\tilde{p}}{\tilde{r}} \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (2.96)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{\tilde{p}}{r} \cos \theta + i \frac{1}{2} \frac{r^2 - \tilde{p}^2 \cos^2 \theta - j \cdot \sin^2 \theta}{r \sin \theta}, \\ T_{12} &= i \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \sin \theta + \frac{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta}{r \sin \theta} - \frac{r}{\sin \theta} \right), \\ T_{21} &= i \frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sin \theta} - \frac{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta}{r \sin \theta} - \frac{\sin \theta}{r} \right), \\ T_{22} &= \frac{\tilde{p}}{r} \cos \theta - i \frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sin \theta} - \frac{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta}{r \sin \theta} - \frac{\sin \theta}{r} \right); \end{aligned} \right\} \quad (2.97)$$

$$[S] = -\frac{1}{(1-j\tilde{p} \operatorname{ctg} \theta)^2 + r^2 \operatorname{csc}^2 \theta} \times \begin{bmatrix} 1 + \tilde{p}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \operatorname{csc}^2 \theta & j2r \operatorname{csc} \theta \\ j2r \operatorname{csc} \theta & 1 + \tilde{p}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \operatorname{csc}^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2.98)$$

Плечо 3 (или 4) работает в режиме КЗ, а плечо 2 (или 1) в режиме ХХ (рис. 2.14):

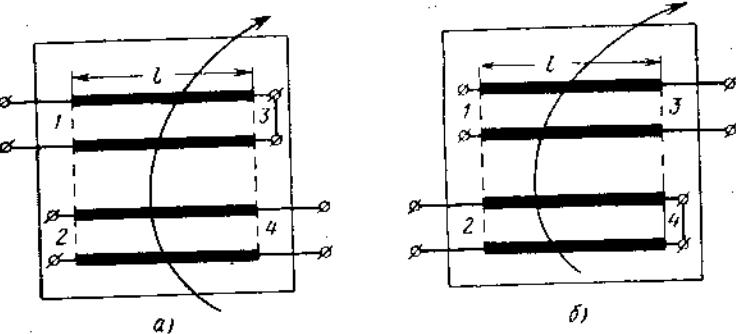


Рис. 2.14. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—КЗ плеча 3, ХХ плеча 2; б—КЗ плеча 4, ХХ плеча 1.

$$[a] = \begin{bmatrix} \infty & -\infty \\ \infty & -\infty \end{bmatrix}; \quad (2.99)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta & 0 \\ 0 & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.100)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{p}} & 0 \\ 0 & -j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{tg} \theta \end{bmatrix}. \quad (2.101)$$

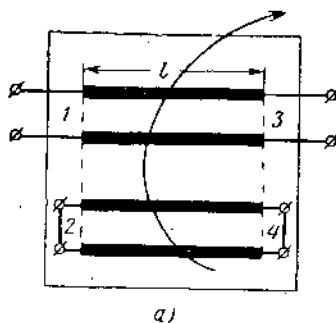
Характеристические параметры:

$$z_{c1} = j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta, \quad z_{c2} = j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{ctg} \theta; \quad \cos \beta = \infty. \quad (2.102)$$

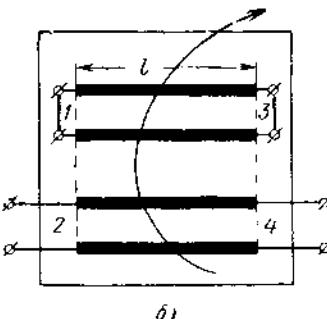
$$[T] = \begin{bmatrix} \infty & -\infty \\ \infty & -\infty \end{bmatrix}; \quad (2.103)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{p} + j \operatorname{ctg} \theta}{\tilde{p} - j \operatorname{ctg} \theta} & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2 - j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2 + j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta} \end{bmatrix}. \quad (2.104)$$

Плечи 2 и 4 (или 1 и 3) работают в режиме КЗ (рис. 2.15):



а)



б)

Рис. 2.15. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—КЗ плеч 2 и 4; б—КЗ плеч 1 и 3.

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \sin \theta \\ j \frac{\tilde{p} \sin \theta}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.105)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{ctg} \theta & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \csc \theta \\ -j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \csc \theta & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.106)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta & j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \csc \theta \\ -j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \csc \theta & j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}. \quad (2.107)$$

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}}, \\ \cos \beta &= \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (2.108)$$

$$T_{11} = \cos \theta + j \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} + \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \right) \sin \theta,$$

$$T_{12} = j \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} - \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \right) \sin \theta,$$

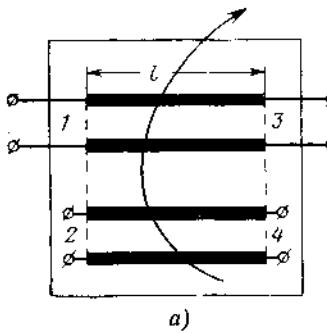
$$T_{21} = -j \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} - \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \right) \sin \theta,$$

$$T_{22} = \cos \theta - j \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} + \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \right) \sin \theta;$$

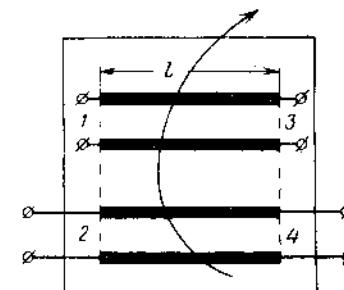
$$[S] = \frac{1}{2 \cos \theta + j \left(\frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} + \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \right) \sin \theta} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} j \left(\frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} - \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \right) \sin \theta & 2 \\ 2 & j \left(\frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} - \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \right) \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (2.110)$$

Плечи 2 и 4 (или 1 и 3) работают в режиме ХХ (рис. 2.16):



а)



б)

Рис. 2.16. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—ХХ плеч 2 и 4; б—ХХ плеч 1 и 3.

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta & j \tilde{p} \sin \theta \\ j \frac{\sin \theta}{\tilde{p}} & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.111)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j \tilde{p} \operatorname{ctg} \theta & j \tilde{p} \csc \theta \\ -j \tilde{p} \csc \theta & j \tilde{p} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.112)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{p}} & j \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{p}} \\ -j \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{p}} & j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{p}} \end{bmatrix}, \quad (2.113)$$

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{array}{l} z_c = \tilde{p}, \\ \cos \beta = \cos \theta; \end{array} \right\} \quad (2.114)$$

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta + j \left(\rho + \frac{1}{\rho} \right) \sin \theta & j \left(\frac{1}{\rho} - \rho \right) \sin \theta \\ -j \left(\frac{1}{\rho} - \rho \right) \sin \theta & 2 \cos \theta - j \left(\rho + \frac{1}{\rho} \right) \sin \theta \end{bmatrix}; \quad (2.115)$$

$$[S] = \frac{1}{1 - \left(\cos \theta + j \frac{1}{\rho} \sin \theta \right)^2} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{1}{\rho^2} \right) \sin^2 \theta & -j 2 \frac{1}{\rho} \sin \theta \\ -j 2 \frac{1}{\rho} \sin \theta & \left(1 - \frac{1}{\rho^2} \right) \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2.116)$$

Плечо 2 (или 1) работает в режиме ХХ, а плечо 4 (или 3) — в режиме КЗ (рис. 2.17):

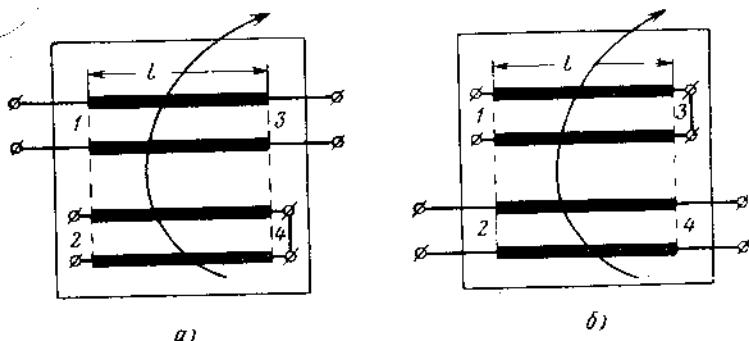


Рис. 2.17. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—ХХ плеча 2, КЗ плеча 4; б—ХХ плеча 1, КЗ плеча 3.

$$[a] = \begin{bmatrix} -\frac{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2 \cos^2 \theta}{(\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \cos \theta} & j \frac{\tilde{p} \sin \theta}{\tilde{r}} \\ j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (2.117)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} j \frac{(-\tilde{p}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta + \tilde{r}^2 \operatorname{csc}^2 \theta)}{\tilde{p} \operatorname{ctg} \theta} & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{csc} \theta \\ -j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{csc} \theta & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{p}} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.118)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{p}} & j \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{p}} \\ -j \frac{\operatorname{csc} \theta}{\tilde{p}} & -j \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2 \cos^2 \theta}{\tilde{p} (\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \sin \theta \cos \theta} \end{bmatrix}. \quad (2.119)$$

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{array}{l} z_{c1} = \frac{\sqrt{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}}{\cos \theta}, \\ z_{c2} = \frac{(\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \cos \theta}{\sqrt{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}}, \\ \cos \beta = \sqrt{\frac{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}}. \end{array} \right\} \quad (2.120)$$

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} M + N + j(L + K) & M - N - j(L - K) \\ M - N + j(L - K) & M + N - j(L - K) \end{bmatrix}; \quad (2.121)$$

$$[S] = \frac{1}{M + N + j(L - K)} \begin{bmatrix} M - N + j(L - K) & 2 \\ 2 & N - M + j(L - K) \end{bmatrix}, \quad (2.122)$$

где

$$M = \frac{\tilde{p}^2 \cos^2 \theta - \tilde{r}^2}{(\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \cos \theta};$$

$$L = \rho \sin \theta;$$

$$N = \cos \theta;$$

$$K = \frac{\rho \sin \theta}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}.$$

Плечи 3 и 4 (или 1 и 2) работают в режиме КЗ (рис. 2.18):

$$[a] = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{p}}{\tilde{r}} & j \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{\tilde{r}} \operatorname{tg} \theta \\ -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\tilde{r}} & \frac{\tilde{p}}{\tilde{r}} \end{bmatrix}; \quad (2.123)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta & -j\tilde{r} \operatorname{tg} \theta \\ j\tilde{r} \operatorname{tg} \theta & -j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.124)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} -j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta & j \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta \\ -j \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta & j \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}. \quad (2.125)$$

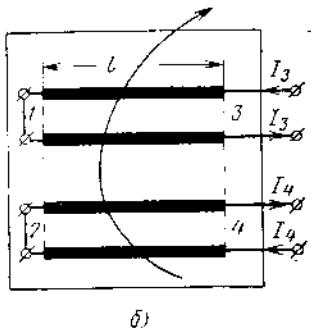
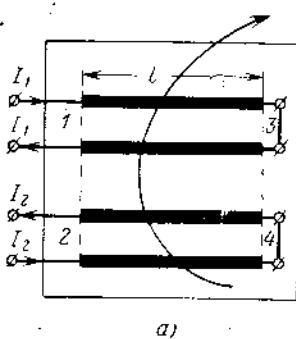


Рис. 2.18. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—КЗ плеч 3 и 4; б—КЗ плеч 1 и 2.

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= \frac{\sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2}}{\operatorname{ctg} \theta} \\ \cos \beta &= \frac{\tilde{p}}{\tilde{r}} \end{aligned} \right\} \quad (2.126)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{\tilde{p}}{r} + j \frac{1}{2r} ((\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{tg} \theta - \operatorname{ctg} \theta), \\ T_{12} &= -j \frac{1}{2r} ((\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{tg} \theta + \operatorname{ctg} \theta), \\ T_{21} &= j \frac{1}{2r} ((\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{tg} \theta + \operatorname{ctg} \theta), \\ T_{22} &= \frac{\tilde{p}}{r} - j \frac{1}{2r} ((\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{tg} \theta - \operatorname{ctg} \theta); \\ |S| &= \frac{1}{2 \frac{\tilde{p}}{r} + j \frac{1}{r} ((\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{tg} \theta - \operatorname{ctg} \theta)} \end{aligned} \right\} \quad (2.127)$$

$$\times \begin{bmatrix} i \left\{ \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{tg} \theta + \frac{1}{r} \operatorname{ctg} \theta \right\} & 2 \\ 2 & i \left\{ \frac{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{tg} \theta + \frac{1}{r} \operatorname{ctg} \theta \right\} \end{bmatrix}. \quad (2.128)$$

Плечо 3 (или 1) работает в режиме КЗ, а плечо 4 (или 2)—в режиме ХХ (рис. 2.19):

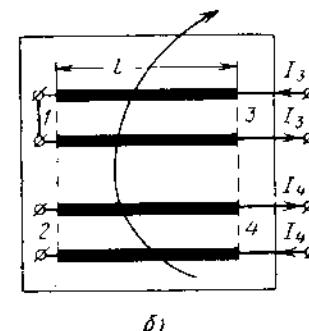
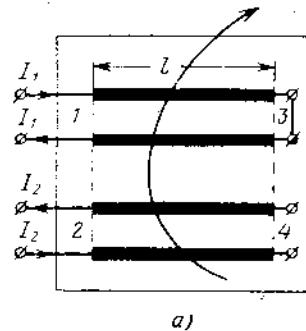


Рис. 2.19. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—КЗ плеча 3, ХХ плеча 4; б—КЗ плеча 1, ХХ плеча 2.

$$[a] = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{p}}{r} & j \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2}{r} \operatorname{ctg} \theta \\ -j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} & -\frac{\tilde{p}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - \tilde{r}^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{p}} \end{bmatrix}; \quad (2.129)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} j\tilde{p} \operatorname{tg} \theta & -j\tilde{r} \operatorname{tg} \theta \\ j\tilde{r} \operatorname{tg} \theta & j \frac{\tilde{p}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - \tilde{r}^2 \csc^2 \theta}{\tilde{p} \operatorname{ctg} \theta} \end{bmatrix}; \quad (2.130)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} i \frac{\tilde{p}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - \tilde{r}^2 \csc^2 \theta}{\tilde{p} (\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \operatorname{ctg} \theta} & j \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2} \operatorname{tg} \theta \\ -j \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2} \operatorname{tg} \theta & j \frac{\tilde{p}}{\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2} \operatorname{tg} \theta \end{bmatrix}. \quad (2.131)$$

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} z_{c1} &= \frac{\tilde{r} \sin \theta \sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2}}{\sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta}}, \\ z_{c2} &= \frac{\sqrt{(\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2)(\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta)}}{\tilde{r} \sin \theta}, \end{aligned} \right\} \quad (2.132)$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta}}{\tilde{r} \sin \theta}.$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tilde{r}}{r} - \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 - 1) \right\}, \\ T_{12} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tilde{r}}{r} + \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} - j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 + 1) \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (2.133)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{21} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tilde{r}}{r} + \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 + 1) \right\}, \\ T_{22} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tilde{r}}{r} - \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} - j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 - 1) \right\}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \frac{\frac{\tilde{r}}{r} + \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 + 1)}{\frac{\tilde{r}}{r} - \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 - 1)}, \\ S_{12} &= S_{21} = \frac{2}{\frac{\tilde{r}}{r} - \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 - 1)}, \end{aligned} \right\} \quad (2.134)$$

$$S_{22} = \frac{\frac{\tilde{r}}{r} - \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 + 1)}{\frac{\tilde{r}}{r} - \frac{\tilde{r}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta - r^2 \csc^2 \theta}{r \tilde{r}} + j \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} (r^2 - \tilde{r}^2 - 1)}.$$

Плечи 3 и 4 (или 1 и 2) работают в режиме ХХ (рис. 2.20)

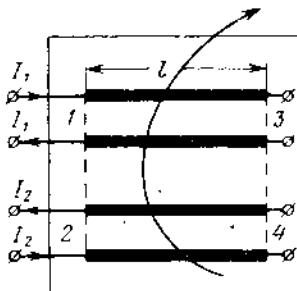
$$[a] = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{r}}{r} & -j \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{ctg} \theta \\ j \frac{\operatorname{tg} \theta}{\tilde{r}} & \frac{\tilde{r}}{r} \end{bmatrix}; \quad (2.135)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & j \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta \\ -j \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta & j \tilde{r} \operatorname{ctg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.136)$$

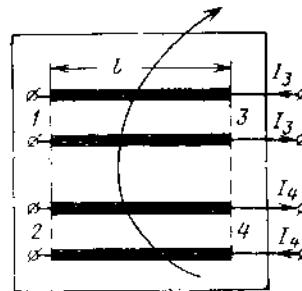
$$[y] = \begin{bmatrix} i \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{tg} \theta & -j \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{tg} \theta \\ j \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{tg} \theta & -j \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{tg} \theta \end{bmatrix}; \quad (2.137)$$

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= \sqrt{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2} \operatorname{ctg} \theta, \\ \cos \beta &= \frac{\tilde{r}}{\tilde{r}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.138)$$



а)



б)

Рис. 2.20. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—ХХ плеч 3 и 4; б—ХХ плеч 1 и 2.

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \frac{\tilde{r}}{r} + j \left(\frac{1}{r} \operatorname{tg} \theta - \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{ctg} \theta \right) & j \left(\frac{1}{r} \operatorname{tg} \theta + \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{ctg} \theta \right) \\ -j \left(\frac{1}{r} \operatorname{tg} \theta + \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{ctg} \theta \right) & 2 \frac{\tilde{r}}{r} - j \left(\frac{1}{r} \operatorname{tg} \theta - \frac{\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2}{r} \operatorname{ctg} \theta \right) \end{bmatrix}; \quad (2.139)$$

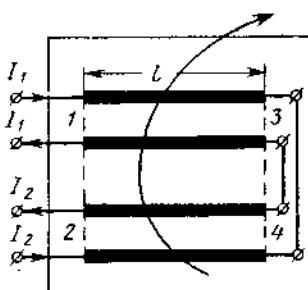
$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= S_{22} = -i \frac{(\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{ctg} \theta + \operatorname{tg} \theta}{2 \tilde{r} + j (\operatorname{tg} \theta - (\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{ctg} \theta)}, \\ S_{12} &= S_{21} = \frac{2 \tilde{r}}{2 \tilde{r} + j (\operatorname{tg} \theta - (\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2) \operatorname{ctg} \theta)}. \end{aligned} \right\} \quad (2.140)$$

Плечи 3 и 4 (или 1 и 2) соединены между собой (рис. 2.21):

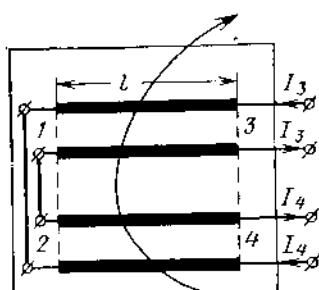
$$[a] = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}} & -i \frac{(\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2) \sin 2\theta}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}} \\ j \frac{\sin 2\theta}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}} & \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}} \end{bmatrix}; \quad (2.141)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} -j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\sin 2\theta} & j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\sin 2\theta} \\ -j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\sin 2\theta} & j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\sin 2\theta} \end{bmatrix}; \quad (2.142)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{(\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \sin 2\theta} & -j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{(\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \sin 2\theta} \\ j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{(\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \sin 2\theta} & -j \frac{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{r}}{(\tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \sin 2\theta} \end{bmatrix}. \quad (2.143)$$



a)



b)

Рис. 2.21. Восьмиполюсник на связанных линиях:
а—соединены плечи 3 и 4; б—соединены плечи 1 и 2.

Характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= \sqrt{\tilde{p}^2 - \tilde{r}^2}, \\ \cos \beta &= \frac{\tilde{p} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}}; \end{aligned} \right\} \quad (2.144)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{1}{2} \left\{ 2 \frac{\tilde{p} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}} + j \frac{\sin 2\theta}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}} (1 - \tilde{r}^2 + \tilde{p}^2) \right\}, \\ T_{12} &= \frac{1}{2} \left\{ j \frac{\sin 2\theta}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}} (1 + \tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \right\}, \\ T_{21} &= -\frac{1}{2} \left\{ j \frac{\sin 2\theta}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}} (1 + \tilde{r}^2 - \tilde{p}^2) \right\}, \\ T_{22} &= \frac{1}{2} \left\{ 2 \frac{\tilde{p} \cos 2\theta + \tilde{r}}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}} - j \frac{\sin 2\theta}{\tilde{r} \cos 2\theta + \tilde{p}} (1 - \tilde{r}^2 + \tilde{p}^2) \right\}; \end{aligned} \right\} \quad (2.145)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{11} = S_{22} &= -j \frac{(r^2 - p^2 + 1) \sin 2\theta}{2(p \cos 2\theta + r) + j \sin 2\theta (1 - r^2 + p^2)}, \\ S_{12} = S_{21} &= \frac{2(r \cos 2\theta + p)}{2(p \cos 2\theta + r) + j(1 - r^2 + p^2) \sin 2\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.146)$$

Волновые матрицы некоторых четырехполюсников на связанных линиях [случай уравновешенных связей — выполняется условие (2.76)].

Плечи 2 и 3 (или 1 и 4) работают в режиме КЗ (рис. 2.12):

$$[T] = \frac{1}{j2r \sin \theta} \begin{bmatrix} -(\cos \theta + j\beta \sin \theta)^2 & -(1 - r^2 \sin^2 \theta) \\ 1 - r^2 \sin^2 \theta & (\cos \theta - j\beta \sin \theta)^2 \end{bmatrix}; \quad (2.147)$$

$$[S] = \frac{1}{(\cos \theta + j\beta \sin \theta)^2} \begin{bmatrix} -(1 - r^2 \sin^2 \theta) & -j2r \sin \theta \\ -j2r \sin \theta & -(1 - r^2 \sin^2 \theta) \end{bmatrix}. \quad (2.148)$$

Плечи 2 и 3 (или 1 и 4) работают в режиме ХХ (рис. 2.13):

$$[T] = \frac{1}{j2r \sin \theta} \begin{bmatrix} (\cos \theta + j\beta \sin \theta)^2 & -(1 - r^2 \sin^2 \theta) \\ 1 - r^2 \sin^2 \theta & -(\cos \theta - j\beta \sin \theta)^2 \end{bmatrix}; \quad (2.149)$$

$$[S] = \frac{1}{(\cos \theta + j\beta \sin \theta)^2} \begin{bmatrix} 1 - r^2 \sin^2 \theta & j2r \sin \theta \\ j2r \sin \theta & 1 - r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2.150)$$

Плечо 2 (или 1) работает в режиме ХХ, а плечо 4 (или 3) в режиме КЗ (рис. 2.17)

$$[T] = \frac{1}{2 \cos \theta} \begin{bmatrix} 1 + (\cos \theta + j\beta \sin \theta)^2 & -r^2 \sin^2 \theta \\ -r^2 \sin^2 \theta & 1 + (\cos \theta - j\beta \sin \theta)^2 \end{bmatrix}; \quad (2.151)$$

$$[S] = \frac{1}{(\cos \theta + j\beta \sin \theta)^2 + 1} \begin{bmatrix} -r^2 \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \\ 2 \cos \theta & r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2.152)$$

2.15. ЦЕПОЧКИ ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ. СВЯЗАННЫЕ НЕОДНОРОДНЫЕ ЛИНИИ

Элементы матрицы цепочки восьмиполюсников (рис. 2.22) определяются из уравнений в конечных разностях либо (приближенно) из решения сумматорных уравнений.

Для цепочки, состоящей из обратимых симметричных сопротивленных звеньев, разностные уравнения имеют вид [3]

$$\left. \begin{aligned} A_{k+1} &= \left(a_{k+1} + \frac{b_{k+1}}{b_k} a_k \right) A_k + \frac{b_{k+1}}{l_k} A_{k-1}, \\ B_{k+1} &= \left(a_{k+1} + \frac{b_{k+1}}{b_k} a_k \right) B_k + \frac{b_{k+1}}{l_k} B_{k-1}, \\ L_{k+1} &= \left(p_{k+1} + \frac{l_{k+1}}{l_k} p_k \right) L_k + \frac{l_{k+1}}{b_k} L_{k-1}, \\ P_{k+1} &= \left(p_{k+1} + \frac{l_{k+1}}{l_k} p_k \right) P_k + \frac{l_{k+1}}{b_k} P_{k-1}, \end{aligned} \right\} \quad (2.153)$$

где $\begin{bmatrix} a & b & 0 & 0 \\ b & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & t \\ 0 & 0 & l & p \end{bmatrix}_i$ — матрица передачи i -го сонаправленного (т. е. обладающего направленностью первого рода, см. § 2.7) звена;

$\begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 \\ B & A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & L \\ 0 & 0 & L & P \end{bmatrix}_i$ — матрица передачи цепочки, состоящей из i сонаправленных звеньев.

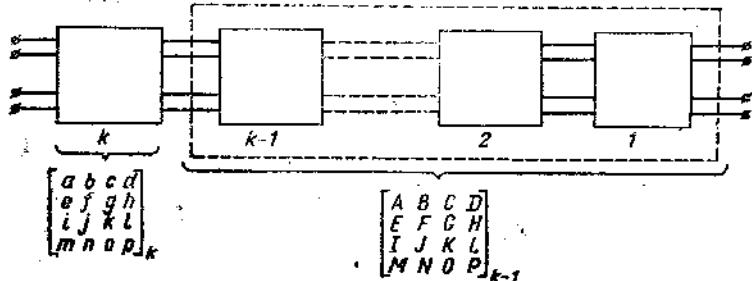


Рис. 2.22. Цепочка восьмиполюсников.

Для цепочки, состоящей из обратимых симметричных противона правленных звеньев, разностные уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} A_{k+1} &= \left(a_{k+1} + \frac{d_{k+1}}{d_k} p_k \right) A_k - \frac{d_{k+1}}{d_k} A_{k-1}, \\ M_{k+1} &= \left(p_{k+1} + \frac{m_{k+1}}{m_k} a_k \right) M_k - \frac{m_{k+1}}{m_k} M_{k-1}, \\ D_{k+1} &= \left(a_{k+1} + \frac{d_{k+1}}{d_k} p_k \right) D_k - \frac{d_{k+1}}{d_k} D_{k-1}, \\ P_{k+1} &= \left(p_{k+1} + \frac{m_{k+1}}{m_k} a_k \right) P_k - \frac{m_{k+1}}{m_k} P_{k-1}, \end{aligned} \right\} \quad (2.154)$$

где $\begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix}_i$ — матрица передачи i -го противона правленного (т. е. обладающего направленностью второго рода, см. § 2.7) звена;

$\begin{bmatrix} A & B & 0 & D \\ 0 & A & D & 0 \\ 0 & M & P & 0 \\ M & 0 & 0 & P \end{bmatrix}_i$ — матрица передачи цепочки, состоящей из i противона правленных звеньев.

Некоторые случаи решения этих уравнений даны в [3]. Сумматорные уравнения для цепочки произвольных восьмиполюсников см. [3].

В случае полной симметрии каждого звена первая итерация приводит к следующим выражениям для элементов матрицы рас сеяния цепочки:

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= - \sum_{\alpha=1}^k \frac{c_\alpha}{a_\alpha} \prod_{q=\alpha+1}^k \frac{k_q}{a_q}, \\ S_{12} &= - \sum_{\alpha=1}^k \frac{d_\alpha}{a_\alpha} \prod_{q=\alpha+1}^k \frac{k_q}{a_q}, \\ S_{13} &= \frac{1}{\prod_{q=1}^k a_q}; \\ S_{14} &= - \frac{1}{\prod_{q=1}^k a_q} \sum_{\alpha=1}^k \frac{b_\alpha}{a_\alpha}, \\ S_{23} &= - \sum_{\alpha=1}^k \frac{c_\alpha}{a_\alpha} \prod_{q=1}^{\alpha-1} \frac{k_q}{a_q}, \\ S_{34} &= - \sum_{\alpha=1}^k \frac{d_\alpha}{a_\alpha} \prod_{q=1}^{\alpha-1} \frac{k_q}{a_q}, \end{aligned} \right\} \quad (2.155)$$

где $\begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix}_i$ — матрица передачи i -го звена цепочки.

Если звено представляет собой восьмиполюсник, соединённый справа и слева с отрезками однородных линий (рис. 2.23), то выражения (2.155) упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= e^{-jB} \sum_{\alpha=1}^n S_{11}^\alpha e^{-j/2(n-\alpha)\theta}, \\ S_{12} &= e^{-jB} \sum_{\alpha=1}^n S_{12}^\alpha e^{-j/2(n-\alpha)\theta}, \\ S_{13} &= e^{-jn\theta}, \\ S_{14} &= e^{-jn\theta} \sum_{\alpha=1}^n S_{14}^\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2.156)$$

Связанные неоднородные линии с непрерывно изменяющимися погонными параметрами являются предельным случаем цепочки восьмиполосников. Простые уравнения можно получить, если положить, что каждое звено цепочки идеально направлено и согласовано. Тогда предельный переход [3] в сумматорных уравнениях приводит к интегральным уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} A(l) &= e^{-jm \int_0^l p(x) dx} - jm \int_0^l r(x) M(x) e^{jm \int_x^l p(x) dx} dx, \\ M(l) &= jm \int_0^l r(x) A(x) e^{-jm \int_x^l p(x) dx} dx, \end{aligned} \right\} \quad (2.157)$$

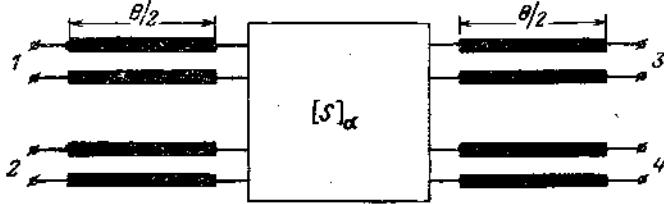


Рис. 2.23. Восьмиполосник, включенный между отрезками длинных линий.

$$\text{где } m = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$p = \sqrt{1 + r^2};$$

r — сопротивление связи.

Уравнения (2.157) описывают связанные неоднородные линии, согласованные и идеально направленные в любом своем сечении (т. е. $r(x)v(x) = 1$, см. также § 2.7). Интегральными уравнениями (2.157) соответствуют дифференциальные уравнения

$$\left. \begin{aligned} A' &= jm(pA - rM), \\ M' &= -jm(pM - rA). \end{aligned} \right\} \quad (2.158)$$

Приближенное решение уравнений (2.157) имеет вид

$$A(l) = e^{-jm \int_0^l p(x) dx}, \quad (2.159)$$

$$M(l) = jm \int_0^l r(x) e^{-jm \int_x^l p(x) dx} dx. \quad (2.160)$$

Оценка погрешности первого приближения производится с помощью соотношений

$$\Delta A \ll \operatorname{ch}(r_M ml) - 1; \quad \Delta M \ll \operatorname{sh}(r_M ml) - r_M ml, \quad (2.161)$$

где

$$r_M \geq r(x). \quad (2.162)$$

Квадрат модуля элемента M матрицы передачи, описываемый выражением (2.160), имеет физический смысл коэффициента деления мощности между плечами 2 и 3. Это обстоятельство используется для синтеза связанных неоднородных линий [3].

ЛИТЕРАТУРА

- Черне Х. И. Некоторые вопросы теории 2 n -полюсника. Труды учебных институтов связи, 1963, вып. 18.
- Зелях Э. В. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд-во АН СССР, 1951.
- Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. Изд-во «Связь», 1965.
- Силин Р. Я. Свойства волновых матриц 2 $(p+1)$ -полюсника. «Радиотехника и электроника», 1959, т. 4, № 10.
- Пистолькорс А. А. Антенны. Связьиздат, 1947.
- Полосковые системы сверхвысоких частот. Сб. статей под ред. В. И. Сушкича. Изд-во иностранной литературы, 1959.
- Коган Н. Л., Машковцев Б. М., Цабизов К. Н. Сложные волноводные системы. Судпромгиз, 1963.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПЕРЕДАЮЩИЕ ЛИНИИ

3.1. ВОЛНОВЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Волновым сопротивлением передающей линии, в которой распространяется волна ТЕМ, называется отношение напряжения между проводами к току в одном из проводов в режиме бегущей волны. В случае волновода это определение волнового сопротивления лишено смысла. В некоторых случаях могут применяться частные определения волнового сопротивления волновода¹, имеющие ограниченную область применения [1, 2, 3, 5, 21]. Так, например, в случае прямоугольного волновода при волне типа H_{10} имеем:

1) волновое сопротивление по напряжению и току ρ_{UI} определяется как отношение максимальной амплитуды напряжения (U_m) к амплитуде суммарного продольного тока в широкой стенке;

2) волновое сопротивление по мощности и напряжению ρ_{PU} определяется как отношение квадрата максимальной амплитуды напряжения (U_m^2) к удвоенной мощности, переносимой по волноводу в режиме бегущей волны;

3) волновое сопротивление по мощности и току ρ_{PI} определяется как отношение удвоенной мощности, переносимой по волноводу в режиме бегущей волны, к квадрату амплитуды суммарного продольного тока.

В формулах для волнового сопротивления по перечисленным определениям имеется одинаковый множитель ρ_H , называемый удельным волновым сопротивлением.

Волновые сопротивления некоторых типов передающих линий сведены в табл. 3.1.

3.2. ПОСТОЯННАЯ ЗАТУХАНИЯ

Постоянные затухания α некоторых типов передающих линий сведены в табл. 3.2 [3, 5, 21], а вспомогательные величины к ней — в табл. 3.3 [21].

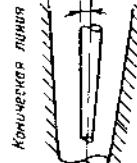
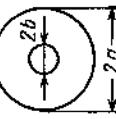
Таблица 3.1

Волновые сопротивления некоторых типов передающих линий	
Тип линии	Волновое сопротивление ρ , см
<i>Прямоугольная линия</i>	$\rho = 120 \pi \frac{d}{b}$ $\text{для } \frac{d}{b} \ll 1$ $\rho = 120 \ln \left(4 \frac{d}{b} \right)$ $\text{для } \frac{d}{b} \gg 1$
<i>Двухпроводная линия</i>	$\rho = 120 \ln \left[\frac{d}{b} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{b}{d} \right)^2} \right) \right] \approx 120 \ln \left(2 \frac{d}{b} \right) = 276 \lg \frac{2d}{b}$ $\text{для } \frac{d}{b} \gg 1$
<i>Волновод</i>	$\rho = \frac{15 \pi^2}{\ln \left(\frac{4}{1 - b/d} \right)}$ $\text{для } \frac{d}{b} \approx 1$ $\rho = 60 \ln \left(2 \frac{d}{b} \right)$ $\text{для } \frac{d}{b} \gg 1$

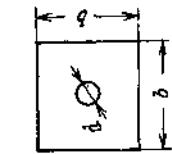
¹ См. также § 4.6.

Тип линии	Волновое сопротивление ρ , Ом
Квадратная линия	$\rho = 60 \ln \frac{a}{b} \approx 138 \lg \frac{a}{b}$

Квадратная линия



$$\rho = 60 \ln \frac{\tanh d/2}{\tanh b/2}$$



$$\rho = 60 \ln \left(1.08 \frac{b}{d} \right) \approx 138 \lg \left(1.08 \frac{b}{d} \right)$$

при $\frac{d}{b} < 0.5$

85-1

Продолжение табл. 3.1

Тип линии	Волновое сопротивление ρ , Ом	Продолжение
Линия с зазором	$\rho = 60 \ln \frac{4b}{\pi d_0} \approx 138 \lg \left(1.27 \frac{b}{d_0} \right)$	[см. гл. 5. формула (5.16)]
Синфазное возбуждение	$\rho = 30 \ln \frac{r^4 - (d/2)^4}{b r^2 d}$	$\rho = 120 \ln \left\{ \frac{d}{b} \cdot \frac{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}{r^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right\}$
Противофазное возбуждение	$\rho = \frac{15\pi^2}{\ln \left(\frac{3.06}{1 - b/d} \right)}$	$\rho = 60 \ln \left(2.16 \frac{d}{b} \right)$ для $\frac{d}{b} \approx 1$

Тип линии	Волновое сопротивление ρ , Ом
Симметрированная полосковая линия	$\rho = \frac{15\pi^2}{\ln 2 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{w}{b}}$ для $\frac{b}{w} \ll 1$
Несимметрированная полосковая линия	$\rho_{UJ} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{a} \rho_H$ $\rho_{PU} = 2\rho_H \frac{b}{a}$ $\rho_{PI} = \frac{\pi^2}{8} \rho_H \frac{b}{a}$ $\rho = Cb \Lambda$. C — постоянная, не зависящая от a и b (см. § 4.6)
Прямоугольный волновод	$\rho_H = \sqrt{\frac{120\pi}{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} = 120\pi \frac{\Lambda}{\lambda}$

Таблица 3.2
Постоянные затухания некоторых типов передающих линий

Тип линии	Постоянная затухания α , дБ/м
Квадратная линия	$\alpha = 0,1724 \frac{1 + \frac{a}{b}}{a \sqrt{\epsilon \lambda} \lg \frac{a}{b}}$
Симметричная полосковая линия	См. гл. 5, § 5.4.
Несимметрическая полосковая линия	См. гл. 5, § 5.4.
Прямоугольный волновод	<p>а) Волна H_{mn}</p> $\alpha = \frac{0,793}{b \sqrt{\epsilon \lambda} (1 - \xi^2)} \times$ $\times \left[\frac{b}{(1 - \xi^2)} \frac{\frac{b}{a} \epsilon_n m^2 + \epsilon_m n^2}{\frac{b}{a} m^2 + \frac{a}{b} n^2} + \right.$ $\left. + \xi^2 \left(\frac{b}{a} \epsilon_m + \epsilon_n \right) \right];$ $\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{kp}} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2};$ $\epsilon_n = 1 \text{ при } n = 0; \epsilon_m = 1 \text{ при } m = 0;$ $\epsilon_n = 2 \text{ при } n \neq 0; \epsilon_m = 2 \text{ при } m \neq 0.$

Продолжение табл. 3.2

Тип линии	Постоянная затухания α , дБ/м
	б) Волна H_{10}
	$\alpha = \frac{0,793 \left(1 + 2 \frac{b}{a} \xi^2 \right)}{b \sqrt{\sigma \lambda (1 - \xi^2)}},$ $\xi = \frac{\lambda}{2a}.$
	в) Волна E_{mn}
	$\alpha = \frac{1,586}{a \sqrt{\sigma \lambda (1 - \xi^2)}} \cdot \frac{m^2 + n^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2}{m^2 + n^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2}.$
<i>Круглый волновод</i>	а) Волна H_{mn}
	$\alpha = \frac{0,793}{r \sqrt{\sigma \lambda (1 - \xi^2)}} \left[\xi^2 + \frac{m^2}{\gamma_{mn}^2 - m^2} \right],$ $\xi = \frac{\lambda}{k_{kp}}; \quad k_{kp} — по табл. 3.21;$ $\gamma_{mn} — по табл. 3.20.$
	б) Волна E_{m1}
	$\alpha = \frac{0,793}{r \sqrt{\sigma \lambda (1 - \xi^2)}},$ $\xi = \frac{\lambda}{k_{kp}}; \quad k_{kp} — по табл. 3.22.$

Примечание. Величины, входящие в формулы, измеряются в следующих единицах: σ — сам/м ; λ — м ; a — м ; b — м ; r — м ;

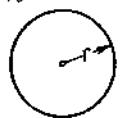


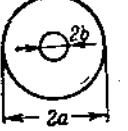
Таблица 3.3

Проводимость металлов с различной степенью обработки токонесущих поверхностей на постоянном токе и на переменном токе частотой 9 Гц [25]

Материал	Проводимость α , $\text{сам/м} \times 10^3$, при 20°C		Характеристика обработки поверхности
	на постоянном токе	на переменном токе частотой 9 Гц	
Серебро	6,165	4,75	Необработанная
Медь	5,970	4,57	
Золото	4,428	4,02	
Алюминий	3,542	2,80	
Мягкая латунь	1,566	1,44	
Фосфористая бронза	0,869	0,89	
Серебро	6,283	4,45	Отожженная в вакууме
Медь	6,085	5,42	
Алюминий	3,604	3,30	
Пружинная латунь	1,303	1,30	
Фосфористая бронза	0,781	0,74	
Серебро	6,165	5,30	Отполированная вручную паждачкой бумагой только в продольном направлении
Медь	5,970	5,25	
Алюминий	3,542	2,94	
Мягкая латунь	1,566	1,56	
Фосфористая бронза	0,869	0,87	
Медь	5,970	5,17	Отполированная паждачкой бумагой (20 продольных движений). Царапины шириной и глубиной в 1 мк
Медь	5,970	4,60	Отполированная паждачкой бумагой (20 продольных движений). Царапины шириной 2,6 мк и глубиной 2 мк

Таблица 3.4

Формулы для вычисления предельной мощности
для некоторых типов передающих линий

Тип линии	Предельная мощность $P_{\text{пред. кат}}$
Коаксиальная линия 	$P_{\text{пред}} = \frac{E_{\text{пред}}^2 b^2}{0,12} \ln \frac{a}{b}$
a) Волна H_{10}	$P_{\text{пред}} = \frac{abE_{\text{пред}}^2}{1,51} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}$
Прямоугольный волновод 	b) Волна H_{11} $P_{\text{пред}} = \frac{abE_{\text{пред}}^2}{3,02} \frac{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}{\left(\frac{a}{b}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}$
	b) Волна E_{11} $P_{\text{пред}} = \frac{abE_{\text{пред}}^2}{3,02} \cdot \frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda}\right)^2 - 1}$
Круглый волновод 	a) Волна H_{11} $P_{\text{пред}} = \frac{\pi r^2 E_{\text{пред}}^2}{1,58} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}$
	b) Волна E_{01} $P_{\text{пред}} = \frac{\pi r^2 E_{\text{пред}}^2}{2,79} \cdot \frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda}\right)^2 - 1}$
	b) Волна H_{01} $P_{\text{пред}} = \frac{\pi r^2 E_{\text{пред}}^2}{1,57} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}$

Причесания: 1. Величины, входящие в формулы, измеряются в следующих единицах: λ —см; $E_{\text{пред}}$ —кв/см; a —см; b —см; r —см. 2. Предельная напряженность поля $E_{\text{пред}}$ для воздуха при нормальном атмосферном давлении, нормальной ионизации и нормальной температуре в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн составляет $E_{\text{пред}} \approx 29$ кв/см, а для элегаза (шестифтористая сера SF_6) $E_{\text{пред}} \approx 90$ кв/см.

Продолжение

Материал	Проводимость σ , $\text{см}/\text{м} \times 10^3$, при 20°C		Характеристика обработки поверхности
	на постоянном токе	на переменном токе частотой 9 Гц	
Мягкая латунь	1,566	1,41	Электрополированная
Медь	5,970	4,90	Электрополированная
Медь	5,970	5,63	Хорошо электрополированная
Медь	5,970	5,63	Очень хорошо электрополированная
Медь	5,970	4,65	5 месяцев после электрополировки
Медь	5,970	3,04	4,5 месяца пребывания под воздействием атмосферных условий

Причесание. Проводимость на частоте 9 Гц определялась [25] путем измерения добротности нагруженной коаксиальной линии, в которой в качестве центрального проводника устанавливался испытуемый образец.

3.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Предельной мощностью пропускания называют мощность, при которой градиент электрического поля в линии в режиме бегущей волны достигает пробивного значения.

Формулы для вычисления предельной мощности [4, 26] для некоторых типов передающих линий сведены в табл. 3.4.

Допустимой (рабочей) мощностью называют предельную мощность пропускания, умноженную на коэффициент запаса электрической прочности. Обычно считают для волноводов

$$P_{\text{доп}} \approx \left(\frac{1}{3} \div \frac{1}{5} \right) P_{\text{пред.}} \quad (3.1)$$

Коэффициент запаса учитывает неоднородности, вызывающие местные концентрации электрического поля, климатические факторы и наличие стоячей волны (обычно считается допустимым КВБ $> 0,7$).

В коаксиальных линиях коэффициент запаса учитывает также электрическую прочность элементов крепления.

Для «металлических изоляторов» и специальных шайб [см. гл. 4] соотношение (3.1) сохраняется. Для полистироловых шайб коэффициент запаса составляет 1/20.

Некоторые числовые характеристики предельной мощности в волноводах, отнесенные к единице площади поперечного сечения волновода, подсчитанные по формулам табл. 3.4 даны в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Формы волновода	Тип волны	$P_{\text{пред}}$, квт/см ²	Формы волновода	Тип волны	$P_{\text{пред}}$, квт/см ²
Прямоугольный волновод	H_{10}	416	Круглый волновод	E_{01}	505
	E_{11}	467		H_{11}	397
	H_{11}	416		H_{01}	401

Пределные мощности в прямоугольных и круглых волноводах, заполненных газами, с учетом температуры, давления газа и коэффициента бегущей волны можно определить по формулам¹:

1) для прямоугольного волновода (волна H_{10})

$$P_{\text{пред}} = 9,87 \cdot 10^{-2} E_{\text{пред}}^2 ab \left(\frac{h_t}{T+t} \right)^2 \left(\frac{1+K}{2} \right)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2}; \quad (3.2)$$

2) для круглого волновода (волна H_{11})

$$P_{\text{пред}} = 0,296 r_0^2 E_{\text{пред}}^2 \left(\frac{h_t}{T+t} \right)^2 \left(\frac{1+K}{2} \right)^2 \times \\ \times \frac{(1+K_h)^2}{1+K_h^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{3,412 r_0} \right)^2}, \quad (3.3)$$

где $P_{\text{пред}}$ — предельная мощность, квт;

$E_{\text{пред}}$ — предельная напряженность при нормальных атмосферных условиях ($h = 760$ мм рт. ст. и $t = 20^\circ\text{C}$), кв/см;

a и b — широкая и узкая стороны волновода, см;

r_0 — радиус волновода круглого сечения, см;

K — коэффициент бегущей волны;

K_h — осевой коэффициент, равный отношению малой оси эллипса поляризации к большой (при линейной поляризации волны $K_h = 0$, а при круговой $K_h = 1$);

h_t — давление газа при данной температуре, мм рт. ст. (приведенные выше формулы справедливы при давлении газа не менее 500 мм рт. ст.);

t — температура газа, $^\circ\text{C}$;

T — температура, равная 273°C ;

λ_0 — длина волны в свободном пространстве, см.

¹ Формулы (3.2) и (3.3) предложены и проверены А. С. Батановым при изменении давления газа: для воздуха — от 500 до 5 000, для элегаза — от 740 до 2 500 мм рт. ст.

3.4. СТАНДАРТЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Волноводы применяются в аппаратуре, работающей в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн от 70 см до 2 мм. Выбор размеров волновода производится с учетом следующих требований: работа на основном (нижнем) типе колебаний в требуемом диапазоне частот; передача максимальной допустимой мощности с минимальным затуханием.

Эти требования являются противоречивыми, поэтому при выборе размеров идут на некоторый компромисс. Так, например, для волны H_{10} в прямоугольном волноводе для работы на основном типе колебаний необходимо выбрать размеры волновода, исходя из условий:

$$\left. \begin{array}{l} a < \lambda < 2a, \\ \lambda > 2b. \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

Для увеличения предельной мощности ($P_{\text{пред}}$) необходимо увеличивать размеры a и b . Кроме того, для увеличения $P_{\text{пред}}$ отношение $\lambda/\lambda_{\text{кр}}$ должно быть не слишком близко к единице.

Обычно берут отношения:

$$\left. \begin{array}{l} a \approx \frac{\lambda}{1,4}, \quad b = (0,4 \div 0,5) a, \\ 1,25 \leq \frac{2a}{\lambda} \leq 1,9. \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

В приводимых ниже стандартах на волноводы соотношение $a = 2b$ не всегда выдержано. Это объясняется тем, что многие стандарты волноводов были выбраны во время войны по аналогии с применявшимися трубами.

В табл. 3.6 указаны стандартные размеры прямоугольных волноводов, взятые из стандарта RETMA TR-108-A (США) [6]. Система обозначений состоит из букв WR (волновод прямоугольный); следующие за ними цифры указывают ширину волновода, выраженную в сотых долях дюйма. Так, например, волновод $WR = 1500$ имеет ширину 15 дюймов (381 мм).

В табл. 3.7 даны американские буквенные обозначения радиоволн [22].

В табл. 3.8 указаны размеры английских серийных прямоугольных волноводов, их предельные и рабочие длины волн (частоты), затухание, допустимые мощности [7].

В табл. 3.9, 3.10 приведены данные из проекта советского стандарта волноводных труб [8, 27].

Конструктивные и электрические данные стандартных волноводов, принятых МЭК (Международной электротехнической комиссией), сведены в табл. 3.11—3.14.

Таблица 3.6

**Размеры, допуски и диапазоны частот
(RETMATR-**

Обозначение	Диапазон частот для основного вида колебаний, тыс. Гц	Размер		
		внутреннее		
		a	b	допуск
WR-1500	0,51— 0,75	381,0000(15,000) ¹	190,5000	±0,3810
WR-1150	0,61— 0,96	292,1000(11,500)	146,0500	±0,3810
WR- 975	0,75— 1,12	247,6500(9,750)	123,8250	±0,2540
WR- 770	0,96— 1,45	195,5800(7,700)	97,7900	±0,1270
WR- 650	1,12— 1,70	165,1000(6,500)	82,5500	±0,1270
WR- 510	1,45— 2,20	129,5400(5,100)	64,7700	±0,1270
WR- 430	1,70— 2,60	109,2200(4,300)	54,6100	±0,1270
WR- 340	2,20— 3,30	86,3600(3,400)	43,1800	±0,1270
WR- 284	2,60— 3,95	72,1360(2,840)	34,0360	±0,1270
WR- 229	3,30— 4,90	58,1660(2,290)	29,0830	±0,1270
WR- 187	3,95— 5,85	47,5488(1,872)	22,1488	±0,1270
WR- 159	4,90— 7,05	40,3860(1,590)	20,1930	±0,1016
WR- 137	5,85— 8,20	34,8488(1,372)	15,7988	±0,1016
WR- 112	7,05— 10,00	28,4988(1,122)	12,6238	±0,1016
WR- 90	8,20— 12,40	22,8600(0,900)	10,1600	±0,0762
WR- 75	10,00— 15,00	19,0500(0,750)	9,5250	±0,0762
WR- 62	12,40— 18,00	15,7988(0,622)	7,8994	±0,0762
WR- 51	15,00— 22,00	12,9540(0,510)	6,4770	±0,0635
WR- 42	18,00— 26,50	10,6680(0,420)	4,3180	±0,0508
WR- 34	22,00— 33,00	8,6360(0,340)	4,3180	±0,0508
WR- 28	26,50— 40,00	7,1120(0,280)	3,5560	±0,0381
WR- 22	33,00— 50,00	5,6890(0,224)	2,8448	±0,0254
WR- 19	40,00— 60,00	4,7752(0,188)	2,3876	±0,0254
WR- 15	50,00— 75,00	3,7592(0,148)	1,8796	±0,0254
WR- 12	60,00— 90,00	3,0988(0,122)	1,5494	±0,0127
WR- 10	75,00—110,00	2,5400(0,100)	1,2700	±0,0127

Примечание: Цифры в скобках означают размер волновода в

**жестких прямоугольных волноводов
108-A, США)**

Размер, мм	внешние			Толщина стенок, мм		Максимальный внутренний радиус, мм
	a ₁	b ₁	допуск	номинал	отклонение от среднего	
387,7350	196,8500	±0,3810	3,175	±0,3810	1,1907	
298,4500	152,4000	±0,3810	3,175	±0,3810	1,1907	
254,0000	130,1750	±0,2540	3,175	±0,2540	1,1907	
201,9380	104,1400	±0,1270	3,175	±0,2286	1,1907	
169,1640	86,6140	±0,1270	2,032	±0,2032	1,1907	
133,6040	68,8340	±0,1270	2,032	±0,2032	1,1907	
113,2840	58,6740	±0,1270	2,032	±0,2032	1,1907	
90,4240	47,2440	±0,1270	2,032	±0,1778	1,1907	
76,2000	38,1000	±0,1270	2,032	±0,1524	1,1907	
61,4172	32,3342	±0,1270	1,6256	±0,1270	1,1907	
50,8000	25,4000	±0,1270	1,6256	±0,1016	0,7938	
43,6372	23,4442	±0,1016	1,6256	±0,1016	0,7938	
38,1000	19,0500	±0,1016	1,6256	±0,1016	0,7938	
31,7500	15,8750	±0,1016	1,6256	±0,1016	0,7938	
25,4000	12,7000	±0,0762	1,2700	±0,1016	0,7938	
21,5900	12,0650	±0,0762	1,2700	±0,1016	0,7938	
17,8308	9,9314	±0,0762	1,0160	±0,0762	0,3969	
14,9860	8,5090	±0,0762	1,0160	±0,0762	0,3969	
12,7000	6,3500	±0,0762	1,0160	±0,0762	0,3969	
10,6680	6,3500	±0,0762	1,0160	±0,0508	0,3969	
9,1440	5,5880	±0,0508	1,0160	±0,0508	0,3969	
7,7210	4,8768	±0,0508	1,0160	±0,0508	0,2540	
6,8072	4,4196	±0,0508	1,0160	±0,0508	0,2540	
5,7912	3,9116	±0,0508	1,0160	±0,0508	0,2032	
5,1308	3,5814	±0,0508	1,0160	±0,0508	0,1424	
4,5720	3,3026	±0,0508	1,0160	±0,0508	0,1424	

дюймах.

Таблица 3.7

Американские буквенные обозначения диапазонов радиоволн

Р-диапазон			S-диапазон			Х-диапазон		
Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см	Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см	Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см
—	0,225 0,390	133,3 76,9	E	1,55 1,65	19,3 18,2	A	5,20 5,50	5,77 5,45
L-диапазон								
Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см	F	1,65 1,85	18,2 16,2	Q	5,50 5,75	5,45 5,22
P	0,390 0,465	76,9 64,5	T	1,85 2,00	16,2 15,0	Y	5,75 6,20	5,22 4,84
C	0,465 0,510	64,5 58,8	C	2,00 2,40	15,0 12,5	D	6,20 6,25	4,84 4,80
L	0,510 0,725	58,8 41,4	Q	2,40 2,60	12,5 11,5	B	6,25 6,90	4,80 4,35
Y	0,725 0,780	41,4 38,4	Y	2,60 2,70	11,5 11,1	R	6,90 7,00	4,35 4,29
T	0,780 0,900	38,4 33,3	G	2,70 2,90	11,1 10,3	C	7,00 8,50	4,29 3,53
S	0,900 0,950	33,3 31,6	S	2,90 3,10	10,3 9,68	L	8,50 9,00	3,53 3,33
X	0,950 1,150	31,6 26,1	A	3,10 3,40	9,68 8,83	S	9,00 9,60	3,33 3,13
K	1,150 1,350	26,1 22,2	W	3,40 3,70	8,83 8,11	X	9,60 10,00	3,13 3,00
F	1,350 1,450	22,2 20,7	H	3,70 3,90	8,11 7,69	F	10,00 10,25	3,00 2,93
Z	1,450 1,550	20,7 19,3	Z	3,90 4,20	7,69 7,15	K	10,25 10,90	2,93 2,75
			D	4,20 5,20	7,15 5,77			

Продолжение

К-диапазон			Q-диапазон			V-диапазон		
Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см	Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см	Поддиапазон	Частота, Гц	Длина волны, см
P	10,90 12,25	2,75 2,45	A	36,00 38,00	0,834 0,790	A	46,00 48,00	0,652 0,625
S	12,25 13,25	2,45 2,26	B	38,00 40,00	0,790 0,750	B	48,00 50,00	0,625 0,600
E	13,25 14,25	2,26 2,10	C	40,00 42,00	0,750 0,715	C	50,00 52,00	0,600 0,577
C	14,25 15,35	2,10 1,95	D	42,00 44,00	0,715 0,682	D	52,00 54,00	0,577 0,556
U	15,35 17,25	1,95 1,74	E	44,00 46,00	0,682 0,652	E	54,00 56,00	0,556 0,536
T	17,25 20,50	1,74 1,46						
Q	20,50 24,50	1,46 1,22						
R	24,50 26,50	1,22 1,13						
M	26,50 28,50	1,13 1,05						
N	28,50 30,70	1,05 0,977						
L	30,70 33,00	0,977 0,909						
A	33,00 36,00	0,909 0,834						

К1-диапазон охватывает поддиапазоны от K_U до K_Q, т. е. 15,35—24,5 Гц; С-диапазон охватывает поддиапазоны от S_Z до X_Y, т. е. 3,9—6,2 Гц.

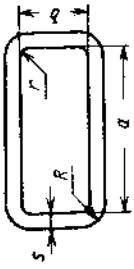
Таблица 3.8

**Технические данные стандартных прямогоугольных волноводов
(английский стандарт)**

Серийный номер волновода	Внутренний прямоугольник		Пределная частота и длина волны основного типа колебаний		Рекомендуемый рабочий диапазон:		Затухание, дБ/100 футов	Максимальность, км
	Ширина <i>a</i> , дюймы	Высота <i>b</i> , дюймы	М.Н.	Гц	см	длина волнны, см		
WG-1	18,000	457,2	9,000	228,6	0,327	91,5	0,41—0,61	73,2—48,8
WG-2	15,000	381,0	7,500	190,5	0,393	76,3	0,51—0,75	60,0—40,0
WG-3	11,500	292,1	5,750	146,05	0,517	58,2	0,61—0,96	48,8—31,2
WG-4	9,750	247,65	4,875	123,825	0,605	49,6	0,75—1,12	40,0—26,7
WG-5	7,700	195,58	3,850	97,79	0,765	39,2	0,96—1,45	31,2—20,7
WG-6	6,500	165,1	3,250	82,55	0,908	33,04	1,12—1,70	26,7—17,7
WG-7	5,100	129,54	2,550	64,77	1,154	25,96	1,45—2,20	20,7—13,6
WG-8	4,300	109,22	2,150	54,61	1,375	21,82	1,70—2,60	17,7—11,5
WG-9	3,500	88,9	1,75	44,45	1,686	17,80	2,20—3,30	13,6—9,1
WG-10	2,840	72,136	1,340	34,036	2,080	14,42	2,60—3,95	11,5—7,60
WG-9A	3,40	86,36	1,7	43,18	1,737	17,30	2,20—3,30	13,6—9,1
WG-11	2,372	60,249	1,122	28,499	2,485	12,06	3,30—4,90	9,10—6,12
WG-11A	2,290	58,166	1,145	29,173	2,570	11,70	3,30—4,90	9,10—6,12
							0,750	0,750

Продолжение табл. 3.8

Серийный номер волновода	Внутренний прямоугольник		Пределная частота и длина волны основного типа колебаний		Рекомендуемый рабочий диапазон:		Затухание дБ/100 футов	Допустимая мощность, квт
	Ширина <i>a</i> , дюймы	Высота <i>b</i> , дюймы	М.Н.	Гц	см	частота, Гц	длина волны, см	
WG-12	1,872	47,549	0,872	22,149	3,155	9,51	3,95—5,85	7,60—5,13
WG-13	1,590	40,386	0,795	20,193	3,710	8,08	4,90—7,05	6,12—4,25
WG-14	1,372	34,849	0,622	15,799	4,285	7,00	5,85—8,2	5,13—3,66
WG-15	1,122	28,499	0,497	12,644	5,260	5,70	7,05—10,0	4,25—2,42
WG-16	0,900	22,86	0,400	10,16	6,56	4,57	8,20—12,4	3,66—2,42
WG-17	0,750	19,05	0,375	9,435	7,87	3,81	10,0—15,0	3,00—2,00
WG-18	0,622	15,799	0,311	7,899	9,49	3,16	12,4—18,0	2,42—1,67
WG-19	0,510	12,954	0,255	6,477	11,57	2,592	15,0—22,0	2,00—1,36
WG-20	0,420	10,668	0,17	4,318	14,08	2,135	18,0—26,5	1,67—1,13
WG-21	0,340	8,636	0,17	4,318	17,37	1,729	22,0—33,0	1,36—0,91
WG-22	0,280	7,112	0,14	3,556	21,10	1,423	26,5—40,0	1,13—0,75
WG-23	0,224	5,69	0,112	2,895	26,35	1,138	33,0—50,0	0,91—0,60
WG-24	0,188	4,775	0,094	2,388	31,4	0,956	40,0—60,0	0,75—0,50
WG-25	0,148	3,759	0,074	1,88	39,9	0,752	50,0—75,0	0,60—0,40
WG-26	0,122	3,099	0,061	1,549	48,4	0,620	60,0—90,0	0,50—0,33
WG-27	0,100	2,54	0,05	1,27	59,0	0,508	75,0—110	0,40—0,27
WG-28	0,080	2,032	0,04	1,016	73,8	0,406	90,0—140	0,33—0,22
WG-29	0,065	1,651	0,0325	0,825	90,9	0,330	110—170	0,27—0,18
WG-30	0,051	1,295	0,0255	0,648	115,8	0,259	140—220	0,22—0,14
WG-31	0,043	1,092	0,0215	0,546	137,5	0,218	170—260	0,18—0,12
WG-32	0,034	0,864	0,0170	0,414	173,3	0,173	220—325	0,14—0,09



Из проекта стандарта СССР (сортамент труб из латуни и меди)

Сечение трубы $a \times b$ мм		Допуск на ширину a и высоту b , ± мм	Толщина стекки s , мм	Допуск на толщину стенки $\pm\text{мм}$	Радиус закругления r исчезающей стекки, мм	Длина не менее, м	Прогиб и скручивание труб на 1 м не более, мм	Марка металла или сплава	Теоретический вес 1 м^3 трубы, кг, при удельном весе металла $8,9$ и П62 = 8,5
$0,7 \times 0,35$		0,01	0,5	0,01	0,01	0,15	—	—	—
$0,9 \times 0,45$		0,01	0,5	0,01	0,01	0,15	—	—	—
$1,1 \times 0,55$		0,01	0,5	0,01	0,01	0,15	—	—	—
$1,3 \times 0,65$		0,01	0,5	0,01	0,01	0,15	—	—	—
$1,6 \times 0,8$		0,01	0,5	0,01	0,01	0,15	—	—	—
2×1		0,02	1,0	0,02	0,02	0,25	—	—	—
$2,4 \times 1,2$		0,02	1,0	0,02	0,02	0,25	—	—	—
$3 \times 1,5$		0,02	1,0	0,02	0,02	0,25	—	—	—

Продолжение табл. 3.9

Сечение трубы $a \times b$, мм	Допуск на ширина a и высоту b , $\pm \text{мм}$	Толщина стенки s , мм	Допуск на толщи- ну стенки s , $\pm \text{мм}$	Радиус закругле- ния r не более, мм	Длина не менее, $м$		Прогиб и скручивание труб на 1 пог. $м$ не более, $мм$	Марка металла или сплава	Теоретический вес 1 пог. $м$ труб, кг, при удельном весе меди, $\text{Л} 96 =$ $8,9$ и $\text{Л} 62 =$ $8,5$
					нормаль- ная	мало- мер- ная			
28,5×12,6	0,05	1,5 3,0	0,06 0,12	0,8 0,8	3,0 3,0	0,5 0,5	0,8 0,8	Л162 Л162	1,124 2,413
35×15	0,05	1,5 3,0	0,06 0,12	0,8 0,8	3,0 3,0	0,5 1,0	0,8 0,8	Л162 Л162	1,352 2,856
40×20	0,06	3,0 2,0	0,06 0,08	0,8 0,8	3,0 3,0	1,0 1,0	0,8 0,8	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	1,682 3,524
46×24	0,07	3,0 2,0	0,08 0,12	0,8 1,2	3,0 3,0	1,0 1,0	0,8 0,8	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	2,706 4,165
58×25	0,07	3,0 2,0	0,12 0,08	1,2 1,2	3,0 3,0	1,0 1,0	0,8 0,8	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	3,097 —
72×34	0,10	3,0 2,0	0,12 0,12	1,2 1,2	3,0 3,0	1,0 1,0	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	3,916 —
90×45	0,15	2,0 3,0	0,08 0,12	1,2 1,2	3,0 3,0	1,0 1,0	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	4,058 —
110×55	0,20	2,5 (120×57)	0,10 0,12	1,2 1,2	2,0 3,0	1,0 1,0	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	7,565 9,772
130×65	0,25	2,5 0,30	0,10 0,12	1,2 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	8,900 10,902
160×80	0,30	2,5 0,30	0,10 0,12	1,0 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	14,738 14,471
180×90	0,30	3,0 0,30	0,12 0,12	1,2 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	16,020 17,622
(180×85)	0,30	3,0 0,30	0,12 0,12	1,2 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	1,0 1,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	17,942 —
196×98	0,30	3,0 0,30	0,12 0,12	1,2 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	2,0 2,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	— —
(220×104)	0,30	3,0 0,30	0,12 0,12	1,2 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	2,0 2,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	— —
220×110	0,30	3,0 0,30	0,12 0,12	1,2 1,2	2,0 2,0	0,5 0,5	2,0 2,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	— —

Продолжение табл. 3.9

Зак. Сечение труба $a \times b$, мм	Допуск на ширина a и высоту b , $\pm \text{мм}$	Толщина стенки s , мм	Допуск на толщи- ну стенки s , $\pm \text{мм}$	Радиус закругле- ния r не более, мм	Длина не менее, $м$		Прогиб и скручивание труб на 1 пог. $м$ не более, $мм$	Марка металла или сплава	Теоретический вес 1 пог. $м$ труб, кг, при удельном весе меди, $\text{Л} 96 =$ $8,9$ и $\text{Л} 62 =$ $8,5$
					нормаль- ная	мало- мер- ная			
248×124	0,35	3,0 0,35	0,12 0,12	2,0 2,0	2,0 2,0	0,5 0,5	2,0 2,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	20,186 21,947
270×135	0,35	3,0 0,35	0,12 0,12	2,0 2,0	2,0 2,0	0,5 0,5	2,0 2,0	М2, М3, Л196 М2, М3, Л196	23,710
292×146	0,35	3,0 0,40	0,12 0,12	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
330×165	0,40	3,0 0,40	0,12 0,12	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
381×190,5	0,40	3,0 0,40	0,12 0,12	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
408×204	0,40	3,0 0,40	0,12 0,12	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
457×228,5	0,40	3,0 0,50	0,12 0,20	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
500×250	0,50	5,0 0,50	0,20 0,20	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
580×290	0,50	5,0 0,50	0,20 0,20	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
620×310	0,50	7,0 0,50	0,28 0,28	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
690×345	0,50	7,0 0,60	0,28 0,28	2,0 2,0	1,0 1,0	0,5 0,5	3,0 3,0	— —	— —
750×375	0,60	7,0 —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —

Приимечания: 1. Сечения, заключенные в скобки, в новых разработках не применять. 2. Допускается по соглашению сторон поставлять трубы с утолщенной толщиной стекки. 3. Примеры условных обозначений золотниковых труб прямост觉ного сечения: а) труба размером 48×24 мм, с толщиной стекки 3 мм, изготовленная из медной трубы M_2 ; б) труба цилиндрической формы размером $28,5 \times 12,6$ мм с толщиной стекки 1,5 мм, изогнутая на изгибе на 90° . 4. Трубы поставляются немаркой. Длины труб по соглашению сторон может производиться поставка труб мерной длины. 5. Внешний радиус R_{ext} .

Таблица 3,10



Из проекта стандарта СССР (сортамент труб из алюминия)

П р и м е ч а н и я. 1. Сечения, заключенные в скобки, в новых разработках не применять. 2. Пример условия обозначения волнодиодной трубы прямого сечения, трубы размером 72×34 мм с толщиной стенки 2,5 мм, изготовленной из алюминия марки А7, трубы ВЛ-72Х-34Х2,5-А7. 3. Внешний радиус $R \leq \frac{d}{4} + \delta$.

Таблица 3.11

Технические данные прямоугольных волноводов
(стандарт, принятый Международной
электротехнической комиссией IEC[29])

Диапазон частот для основного типа волн, Гц		Внутренние размеры		Внешние размеры				Затухание, дБ/м	
от	до	ширина a_1	ширина a_2	ширина b_1	ширина b_2	радиус угла, r_2	расстояние, L_{24}	теоретическая величина	измеренная величина
R3	0,32	0,49	584,2	292,10	—	1,5	—	0,386	0,00078
R4	0,35	0,53	533,4	266,70	—	1,5	—	0,422	0,00090
R5	0,41	0,62	457,2	228,60	—	1,5	—	0,49	0,00113
R6	0,49	0,75	381,0	190,50	—	1,5	—	0,59	0,00149
R8	0,64	0,98	292,10	146,05	—	1,5	—	0,77	0,00222
R9	0,76	1,15	247,65	123,82	—	1,2	—	—	—
R12	0,96	1,46	195,58	97,79	—	1,2	—	—	—
R14	1,14	1,73	165,10	82,55	0,33	1,2	2,030	—	—
R18	1,45	2,20	129,54	64,77	0,26	1,2	2,030	169,16	0,20
R22	1,72	2,61	109,22	54,61	0,22	1,2	2,030	133,60	0,20
R26	2,17	3,30	86,36	43,18	0,17	1,2	2,030	58,67	0,20
R32	2,60	3,95	72,14	34,04	0,14	1,2	2,030	47,24	0,17
							38,10	38,10	1,15

Продолжение табл. 3.11

Диапазон частот для основного типа волн, Гц	Внутренние размеры		Внешние размеры				Затухание, дБ/к	
	от	до	ширина а	ширина сечки б	радиус угла, r_3	теоретическая величина $F_{\text{ac}}^{\text{theor}}$		
			ширина сечки в	ширина сечки г	ширина сечки д	ширина сечки е		
0603B4R153EBC								
R40	3,22	4,90	58,17	29,083	0,12	1,2	1,625	
R48	3,94	5,99	47,55	22,149	0,095	0,8	1,625	
R58	4,64	7,05	40,39	20,193	0,081	0,8	1,625	
R70	5,38	8,17	34,85	15,799	0,070	0,8	1,625	
R84	6,57	9,99	28,99	12,624	0,057	0,8	1,625	
R100	8,20	12,5	22,860	10,160	0,046	0,8	1,270	
R120	9,84	15,0	19,050	9,525	0,038	0,8	1,270	
R140	11,9	18,0	15,799	7,899	0,031	0,4	1,015	
R180	14,5	22,0	12,954	6,477	0,026	0,4	1,015	
R220	17,6	26,7	10,668	4,38	0,021	0,4	1,015	
R260	21,7	33,0	8,636	4,318	0,020	0,4	1,015	
R320	26,4	40,0	7,112	3,556	0,020	0,4	1,015	
R400	32,9	50,1	5,690	2,845	0,020	0,3	1,015	
R500	39,2	59,6	4,775	2,388	0,020	0,3	1,015	
R620	49,8	75,8	3,759	1,880	0,020	0,2	1,015	
R740	60,5	91,9	3,099	1,549	0,020	0,15	1,015	
R900	73,8	112	2,540	1,270	0,020	0,15	1,015	
R1200	92,2	140	2,032	1,016	0,020	0,15	1,015	

Диапазон частот для основного типа волн, Гц	Внутренние размеры		Внешние размеры				Затухание, дБ/к	
	от	до	ширина а	ширина сечки б	радиус угла, r_3	теоретическая величина $F_{\text{ac}}^{\text{theor}}$		
			ширина сечки в	ширина сечки г	ширина сечки д	ширина сечки е		
0603B4R153EBC								
R1400	114	173	1,651	0,826	—	—	—	
R1800	145	220	1,295	0,648	—	—	—	
R2200	172	261	1,092	0,546	—	—	—	
R2600	217	330	0,864	0,432	—	—	—	
R35	2,82	4,29	0,66, 37	0,14	1,2	2,000	70,37, 33, 50	
R41	3,29	5,00	57,00	25,330	0,12	1,2	2,000	

П р и м е ч а н и я. 1. Размеры, приведенные в таблице, даны в миллиметрах. 2. Содержащиеся в наименовании типа волновода число выражает приближенно среднюю частоту генерируемого диапазона в сотнях герц. Например, R12 указывает, что средняя рабочая частота этого вспомогательного волновода равна 1200 Мэц (1,2 Гц). 3. Диапазон частот для основного типа волны волны взят в пределах от 1,25 до 1,9 от критической частоты волновода. 4. Толщина стенки t для ана только для информации. 5. Допуски на внутренние размеры (ширину и высоту) для волноводов R14—R220 н. составляют ± 500 отnominalной внутренней ширины волновода. 6. Допуски на R200 они составляют $\pm 0,02$ мм, для остальных волноводов R14—R22 и составляют $\pm 0,2$ мм, для волноводов R26—R84 они составляют ± 1 от внутренней ширины волновода. 7. Экспериментирует не должен превышать 10% от名义ных размеров (ширины и высоты) для волноводов R14—R100 и волноводов R26—R84 они составляют $\pm 1,5$ от名义ных величин на частоте 1,5 кГц. Величина затухания, приведенные в таблице, даны для медного волновода со стандартным удельным сопротивлением $\rho = 1,7241 \times 10^{-8}$ ом/к. Для волноволов с размерами a , b , c , d , e , f , g , h , t , R и F_{ac} данные по максимальной величине затухания находятся в стадии разработки. 8. Данные для всесоединений A35 и K1 включены как дополнительные за-

Таблица 3.12

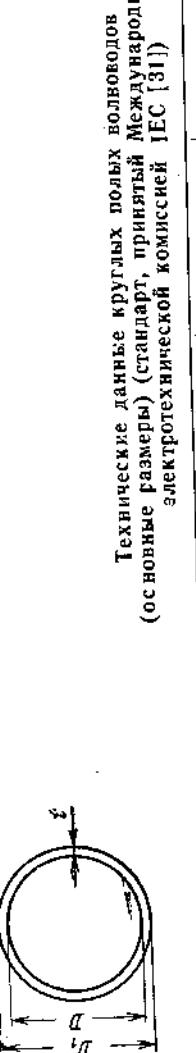
**Технические данные прямоугольных плоских волноводов
(стандарт, принятый международной электротехнической
комиссией IES [30])**

Обозначение типа 1531IES- G	Диапазон частот для основного вида коле- баний, Гц/ ог	Внутренние размеры		Внешние размеры				Затухание, дБ/м	
		a	b	ширина стенки t	высота стенки t	радиус угла r_2	мини- маль- ный диаметр D_{min}	теорети- ческая величина η_{th}	экспери- ментальная величина η_{exp}
F22	1,72	2,61	109,22	13,100	0,11	1,2	2,030	113,28	2,06
F26	2,17	3,30	86,36	10,400	0,086	1,2	2,030	90,42	2,61
F32	2,60	3,95	72,14	8,600	0,072	1,2	2,030	76,20	3,12
F40	3,22	4,90	58,17	7,000	0,058	1,2	1,625	61,42	3,87
F48	3,94	5,99	47,55	5,700	0,048	0,8	1,625	50,80	4,73
F58	4,64	7,05	40,39	5,000	0,040	0,8	1,625	43,64	5,57
F58	5,38	8,17	34,85	5,000	0,035	0,8	1,625	38,10	6,46
F70	6,57	9,99	28,99	5,000	0,028	0,8	1,625	31,75	7,89
F84	8,20	12,5	22,860	5,000	0,023	0,8	1,270	25,40	8,84
F100	3,68	5,60	50,80	16,942	0,06	0,8	1,58	53,96	1,15
F45									4,32

Причесания. 1. Все размеры, приведенные в таблице, даны в миллиметрах. 2. Содержащееся в номинации типа волновода число выражает отnominal'ную высоту (ширину) волновода от внутренней поверхности волновода до наружной. Например, F22 указывает, что средняя частота прямоугольного волновода приблизительно равна 2200 МГц (2,2 ГГц). 3. Диапазон частот для основного типа колебаний волны в пределах от 1,25 до 1,90 от критической частоты волновода. 4. Толщина стекки t дана только для информации. 5. Допуски на внутренние размеры (ширину и высоту) волновода составляют $\pm \frac{1}{100}$ от номинальной ширине волновода. 6. Допуски на внешние размеры (ширину и высоту) волновода составляют $\pm \frac{3}{500}$ от внутренней номинальной толщины стекки. 7. Экспентрикитет не должен превышать 10% от номинальной толщины стекки. 8. Номинальная величина затухания не превышает больше чем в 1,3 раза расчетной величины на частоте 1,5 ГГц для медного волновода со стандартным удельным сопротивлением $\rho = 1,7241 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

9. Данные для плоского волновода типа F45, включены как дополнительные.

Таблица 3.13



**Технические данные круглых полых волноводов
(основные размеры) (стандарт, принятый Международной
электротехнической комиссией IEC [31])**

Обозначение типа 1531IES- G	Критическая частота, Гц, для волни типа			Внутренние размеры		толщи- на стенки t	внешние размеры		затухание на волне типа H_{11} (TE ₁₁), дБ/м	
	H_{11} (TE ₁₁)	E_{11} (TM ₁₁)	H_{01} (TE ₀₁)	H_{01} (TE ₀₁)	диаметр D		диаметр допуск \pm	диаметр D_1	допуск на частоте f	теорети- ческая величина η_{th}
C3,3	0,27	0,35	0,45	0,56	1,03	647,9	0,65	—	—	0,325
C4	0,32	0,41	0,53	0,66	1,21	553,5	0,55	—	—	0,380
C4,5	0,37	0,57	0,62	0,77	1,42	472,8	0,47	—	—	0,446
C5,3	0,43	0,57	0,72	0,90	1,66	403,9	0,40	—	—	0,522
C6,2	0,51	0,66	0,84	1,06	1,94	345,1	0,35	—	—	0,611
C7	0,60	0,78	0,99	1,24	2,27	294,79	0,30	—	—	0,715
C8	0,70	0,91	1,16	1,45	2,66	251,84	0,25	—	—	0,838
C10	0,82	1,07	1,35	1,70	3,11	215,14	0,22	—	—	0,980
C12	0,96	1,25	1,59	1,99	3,64	183,77	0,18	—	—	1,147
C14	1,20	1,46	1,86	2,33	4,26	157,00	0,16	—	—	1,343
C16	1,31	1,71	2,17	2,73	4,99	134,11	0,13	—	—	1,572
C18	1,53	2,00	2,54	3,19	5,84	114,58	0,11	—	—	1,841
C22	1,79	2,34	2,98	3,74	6,84	97,87	0,10	—	—	2,154
C25	2,10	2,74	3,49	4,37	8,01	83,62	0,08	—	—	2,521

Продолжение табл. 3.13

Обозначение типа 153 IEC-	Критическая частота, Гц,				Внутренние размеры		Внешние размеры		Затухание на волне типа H ₁₁ (TE ₁₁), дБ/м				
	H ₁₁ (TE ₁₁)	F _{on} (TM ₀₁)	H ₂₁ (TE ₁₁)	H ₃₁ (TE ₁₁)	диаметр D ₁	толщина стенки f	диаметр D ₂	допуск ±					
C30	2,46	3,21	4,08	5,12	9,37	71,42	0,07	1,650	74,72	0,085	2,952	0,0184	0,024
C35	2,88	3,76	4,77	5,99	11,0	61,04	0,06	1,650	64,34	0,095	3,45b	0,0233	0,030
C40	3,38	4,41	5,61	7,03	12,9	51,99	0,05	1,650	55,29	0,095	4,056	0,0297	0,039
C48	3,95	5,16	6,56	8,23	15,1	44,45	0,044	1,650	47,75	0,080	4,744	0,0375	0,049
C56	4,61	6,02	7,65	9,60	17,6	38,10	0,038	1,650	41,40	0,080	5,534	0,0473	0,062
C65	5,40	7,05	8,96	11,2	20,6	32,54	0,033	1,650	35,84	0,080	6,480	0,0599	0,078
C76	6,32	8,26	10,5	13,2	24,1	27,788	0,028	1,270	30,328	0,080	7,588	0,0759	0,099
C89	7,37	9,63	12,2	15,3	28,1	23,825	0,024	1,270	26,365	0,085	8,850	0,056	0,124
C104	8,68	11,3	14,4	18,1	33,1	20,244	0,020	1,270	22,784	0,065	10,42	0,1220	0,150
C120	10,0	13,1	16,7	20,9	38,3	17,475	0,017	1,270	20,015	0,065	12,07	0,1524	—
C140	11,6	15,2	19,3	24,2	44,4	15,088	0,015	1,015	17,120	0,055	13,98	0,1893	—
C165	13,8	18,1	22,9	28,8	52,7	12,700	0,013	1,015	14,732	0,055	16,61	0,2459	—
C190	15,8	20,6	26,2	32,9	60,2	11,125	—	1,015	13,157	—	18,95	0,3003	—
C220	18,4	24,1	30,6	38,4	70,3	9,525	—	0,760	11,049	—	22,14	0,3787	—
C255	21,1	27,5	35,0	43,9	80,4	8,331	—	0,760	9,855	—	25,31	0,4620	—
C290	24,6	32,2	40,8	51,2	93,8	7,137	—	0,760	8,661	—	29,54	0,5834	—
C330	27,7	36,1	45,9	57,6	105	6,350	—	0,510	7,366	—	33,20	0,6938	—
C380	31,6	41,3	52,4	65,7	120	5,563	—	0,510	6,579	—	37,91	0,8486	—
C430	36,8	48,1	61,0	76,6	140	4,775	—	0,510	5,791	—	44,16	1,0650	—
C495	40,2	52,5	66,7	83,7	153	4,369	—	0,510	5,385	—	48,26	1,2190	—
C580	49,1	64,1	81,4	102	187	3,581	—	0,510	4,597	—	58,88	1,643	—
C660	55,3	72,3	91,8	115	211	3,175	—	0,380	3,937	—	66,41	1,967	—
C765	63,5	82,9	105	132	222	2,769	—	0,380	3,531	—	76,15	2,413	—
C890	73,6	96,1	122	153	280	2,388	—	0,380	3,450	—	88,30	3,011	—

Таблица 3.14
Промежуточные размеры внутреннего диаметра круговых полых волноводов
(рекомендация Международной электротехнической комиссии IEC [31])

Обозначение типа 153 IEC-	Диаметр D						
C3,3	647,9	C14	157,00	C56	38,10	C255	8,331
	623,9		151,00		36,60		8,020
	599,0		145,00		35,20		7,720
	576,0		139,50		33,80		7,420
C4	553,5	C16	134,11	C65	32,54	C290	7,137
	532,0		129,00		31,30		6,940
	512,0		124,00		30,10		6,740
	492,0		119,00		28,900		6,520
C4,5	472,8	C18	114,58	C76	27,788	C330	6,350
	455,0		110,00		26,700		6,140
	437,0		106,00		25,700		5,940
	420,0		102,00		24,800		5,740
C5,3	403,9	C22	97,87	C89	23,825	C380	5,563
	388,0		94,00		22,900		5,360
	373,0		90,40		22,000		5,160
	359,0		87,00		21,100		4,950
C6,2	345,1	C25	83,62	C104	20,244	C430	4,775
	332,0		80,40		19,500		4,670
	319,0		77,20		18,800		4,570
	307,0		74,40		18,150		4,470
C7	294,79	C30	71,42	C120	17,475	C495	4,369
	283,00		68,60		16,850		4,170
	272,00		66,00		16,250		3,960
	262,00		63,40		15,650		3,760
C8	251,84	C35	61,04	C140	15,088	C580	3,581
	242,00		58,60		14,450		3,480
	233,00		56,40		13,850		3,380
	224,00		54,20		13,250		3,280
C10	215,14	C40	51,99	C165	12,700	C660	3,175
	207,00		50,00		12,300		3,070
	199,00		48,10		11,900		2,960
	191,00		46,20		11,500		2,860
C12	183,77	C48	44,45	C190	11,125	C765	2,769
	176,50		42,80		10,760		2,670
	170,00		41,20		10,300		2,570
	163,50		39,60		9,700		2,440
				C220	9,525	C890	2,388
					9,220		2,280
					8,920		2,180
					8,620		

Примечания к табл. 3.13 и 3.14:

1. Все размеры, приведенные в таблице, даны в миллиметрах.
2. Содержащееся в наименовании типа волновода число выражает приблизительно рабочую частоту в сотнях мегагерц для волны H_{11} (TE_{11}).
3. Допуски на внутренние диаметры для волноводов С 3,3 — С 165 составляют $\pm \frac{1}{1000}$ от внутреннего диаметра, а для волноводов С 190 и меньших диаметров допуски находятся в стадии разработки.
4. Допуски на внешние размеры устанавливаются в соответствии с табл. 3.15.

5. Эллиптичность не должна превышать $\frac{1}{1000}$ от поперечного сечения волноводов от С 3,3 до С 165 включительно. Для волноводов С 190 и меньших диаметров требования к эллиптичности находятся в стадии разработки.

6. Эксцентриситет не должен превышать 10% от толщины стенки.

7. Максимальная величина затухания волновода IEC-C104 и волноводов с большими размерами не превышает больше чем в 1,3 раза расчетной величины для волны H_{11} (TE_{11}) на частоте 1,2 f_{kp} . Величины затухания, приведенные в таблице, даны для медного волновода со стандартным удельным сопротивлением $\rho_0 = 1,7241 \times 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Для волноводов с размерами, меньшими, чем у волновода С 104, величины максимального затухания находятся в стадии разработки.

Таблица 3.15

Допуски на внешние размеры

Тип волновода	Допуск \pm , мм
C25 и большего диаметра	Не имеет допуска
C30 — C40	0,095
C48 — C76	0,080
C89 — C120	0,065
C140 — C165	0,055
C190 и меньшего диаметра	В стадии рассмотрения

3.5. ПЕРЕДАЧА МОЩНОСТИ В ОДНОРОДНОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ ПРИ НЕСОГЛАСОВАННЫХ НАГРУЗКАХ

Приведенные ниже энергетические соотношения относятся ко всем типам однородных линий без потерь. Фазовые соотношения исключены с помощью соответствующего выбора длины линии.

В расчетах приняты следующие обозначения:

$L = \frac{P_n}{P_g}$ — коэффициент передачи;

P_n — активная мощность в нагрузке;

P_g — максимальная активная мощность, отдаваемая генератором;

K_n — коэффициент бегущей волны (КБВ) в сторону нагрузки;

K_g — КБВ в сторону генератора.

Минимальный коэффициент передачи (при неблагоприятной длине линии)

$$L_{\min} = \frac{4K_n K_g}{(1 + K_n K_g)^2}. \quad (3.6)$$

Максимальный коэффициент передачи (при благоприятной длине линии)

$$L_{\max} = \frac{4K_n K_g}{(K_n + K_g)^2}. \quad (3.7)$$

Максимальный перепад коэффициента передачи при изменении длины линии

$$\frac{L_{\min}}{L_{\max}} = \left(\frac{K_n + K_g}{1 + K_n K_g} \right)^2. \quad (3.8)$$

Коэффициент передачи при согласованном генераторе ($K_g = 1$)

$$L = \frac{4K_n}{(1 + K_n)^2}. \quad (3.9)$$

На рис. 3.1 приведена зависимость L_{\min} от K для случая, когда генератор и нагрузка рассогласованы в одинаковой степени по отношению к передающей линии.

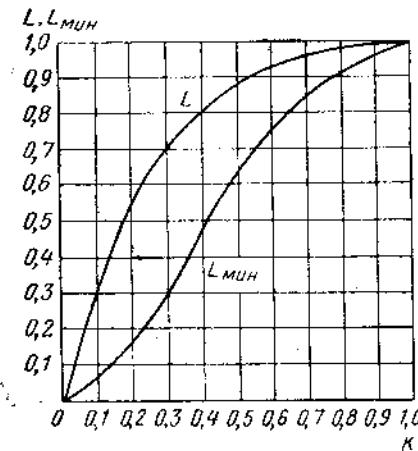


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента передачи от КБВ при согласованном генераторе.

Максимальный коэффициент передачи при $K_n = K_g = K$

$$L_{\max} = 1. \quad (3.10)$$

Максимальный перепад коэффициента передачи (при изменении длины линии) для случая $K_n = K_g = K$

$$\frac{L_{\min}}{L_{\max}} = \frac{4K^2}{(1 + K^2)^2}. \quad (3.11)$$

Модуль коэффициента отражения в линии $|\Gamma|$ связан с КБВ следующим образом:

$$|\Gamma| = \frac{1 - K}{1 + K}. \quad (3.12)$$

3.6. СТРУКТУРА ПОЛЕЙ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Электромагнитное поле в волноводе односвязного сечения с идеально проводящими стенками можно описать с помощью двух типов полей: поперечно-электрического (ТЕ или h -поля) и поперечно-магнитного (TM или e -поля).

В волноводах с многосвязным сечением (двухсвязное сечение, например, имеет коаксиальную линию) существует, кроме того, поперечно-электромагнитное поле (TEM или λ -поля).

Каждый из типов полей TE и TM включает в себя бесчисленное множество единичных полей, отличающихся друг от друга пространственной структурой. Единичное электромагнитное поле можно выразить через скалярную функцию ψ , удовлетворяющую на поперечном сечении S_{\perp} волновода двухмерному уравнению в частных производных (уравнению Гельмгольца) и однородному граничному условию на контуре L этого сечения:

ТЕ-поля

$$\nabla^2 \psi_h + \chi_h^2 \psi_h = 0 \text{ на } S_{\perp} \text{ при } \frac{\partial \psi_h}{\partial n} = 0 \text{ на } L \quad (3.13)$$

$$\left(\frac{\partial \psi_h}{\partial n} - \text{производная по нормали} \right);$$

TM-поля

$$\nabla^2 \psi_e + \chi_e^2 \psi_e = 0 \text{ на } S_{\perp} \text{ при } \psi_e = 0 \text{ на } L. \quad (3.14)$$

Здесь χ_a ($a \equiv h, e$) является характеристическим параметром задачи; ∇^2 — оператор Лапласа второго порядка.

Физически, функции ψ_a определяют силовые линии в поперечном сечении волновода; так, $\psi_h = \text{const}$ есть уравнение электрической силовой линии для TE-полей, а $\psi_e = \text{const}$ есть уравнение магнитной силовой линии для TM-полей.

Магнитные силовые линии TE-полей и электрические силовые линии TM-полей определяются через градиенты функций ψ_h и ψ_e соответственно.

Параметр χ_a имеет смысл критического волнового числа. При практических расчетах часто вместо критического волнового числа вводят понятие критической длины волны

$$\lambda_{a \text{ кр}} = \frac{2\pi}{\chi_a}. \quad (3.15)$$

Скалярная функция для TEM-полей удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\nabla^2 \psi_{\lambda} = 0 \text{ на } S_{\perp} \text{ при } \psi_{\lambda} = \Psi_1 \dots \Psi_m \text{ на } L_1 \dots L_m. \quad (3.16)$$

Здесь Ψ_i — постоянные, имеющие смысл потенциалов на проводниках. Число возможных независимых TEM-полей в неоднородно-связном волноводе конечно и равно числу внутренних проводников.

Скалярные функции образуют ортогональную систему, которую можно нормировать так, чтобы

$$\int \limits_{S_{\perp}} \psi_a \psi_{a'} dS_{\perp} = \delta_{aa'}. \quad (3.17)$$

Здесь и в последующем символ $\delta_{aa'}$ означает

$$\delta_{aa'} = \begin{cases} 1 & \text{при } a' = a; \\ 0 & \text{при } a' \neq a. \end{cases} \quad (3.18)$$

На основе скалярных функций составляется система собственных векторных ортонормированных функций (нормальных волн (см. стр. 136), определяющих поле в поперечном сечении волновода)

Зависимость собственных электрических $\bar{\mathcal{E}}_a$ и магнитных $\bar{\mathcal{H}}_a$ векторов от скалярной функции ψ_a дается в группе формул, сведенной в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Формулы для определения зависимости $\bar{\mathcal{E}}_a$ и $\bar{\mathcal{H}}_a$ от ψ_a

Название вектора	TE (h)-поля	TM (e)-поля	TEM (λ)-поля
Продольный	$\bar{\mathcal{H}}_z = \psi_h \bar{z}^0$	$\bar{\mathcal{E}}_z = \psi_e \bar{z}^0$	Не существует
Поперечный магнитный	$\bar{\mathcal{H}}_h = \frac{\nabla \psi_h}{\chi_h}$	$\bar{\mathcal{H}}_e = -[\bar{\mathcal{E}}_e \bar{z}^0]$	$\bar{\mathcal{H}}_{\lambda} = -[\bar{\mathcal{E}}_{\lambda} \bar{z}^0]$
Поперечный электрический	$\bar{\mathcal{E}}_h = [\bar{\mathcal{H}}_h \bar{z}^0]$	$\bar{\mathcal{E}}_e = \frac{\nabla \psi_e}{\chi_e}$	$\bar{\mathcal{E}}_{\lambda} = \nabla \psi_{\lambda}$

Здесь \bar{z}^0 — орт по продольной координате волновода;

∇ — градиент скалярной функции;

$[\quad]$ — векторное произведение.

Условие ортонормирования собственных векторных функций имеет вид

$$\int \limits_{S_{\perp}} \bar{\mathcal{E}}_a \bar{\mathcal{E}}_{a'} dS_{\perp} = \int \limits_{S_{\perp}} \bar{\mathcal{H}}_a \bar{\mathcal{H}}_{a'} dS_{\perp} = \delta_{aa'}. \quad (3.19)$$

Как видно, TE (h)-поля характеризуются тем, что наряду с поперечными составляющими они имеют еще и продольную магнитную составляющую \bar{H}_z .

TM (e)-поля имеют, помимо поперечных составляющих поля, продольную электрическую составляющую \bar{E}_z .

Между поперечными собственными векторными функциями существует следующее соотношение:

$$\bar{\mathcal{E}}_a = [\bar{\mathcal{H}}_a \bar{z}^0]. \quad (3.20)$$

В комплексной форме зависимость поля в волноводе от продольной координаты z определяется экспоненциальным множителем $e^{\pm \hat{\gamma}_a z}$; здесь $\hat{\gamma}_a$ — постоянная передачи единичного поля, равная

$$\hat{\gamma}_a = \sqrt{\gamma_a^2 - k^2}, \quad (3.21)$$

где k — волновое число, равное

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3.22)$$

причем ω — частота генератора (круговая);

ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей волновод;

λ — длина волны генератора в среде с параметрами ϵ и μ .

Для временной зависимости $e^{+j\omega t}$ экспонента $e^{-\hat{\gamma}_a z}$ соответствует волнам, распространяющимся в положительном направлении, а экспонента $e^{-\hat{\gamma}_a z}$ — в отрицательном направлении z .

Отношение амплитуд поперечной магнитной к поперечной электрической составляющей в единичном поле называется полевой (характеристической) проводимостью.

Для различных классов волн эта проводимость имеет следующие значения:

для ТЕ-поля

$$Y_h = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\hat{\gamma}_h}{jk}; \quad (3.23)$$

для ТМ-поля

$$Y_e = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{jk}{\hat{\gamma}_e}; \quad (3.24)$$

для ТЕМ-поля

$$Y_\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}. \quad (3.25)$$

Обычно размеры поперечного сечения волновода выбираются таким образом, чтобы в волноводе распространялась одна, основная, волна.

Для распространяющихся волн ($\gamma_a < k$) постоянные передачи — мнимые величины:

$$\hat{\gamma}_a = j\gamma_a = j\sqrt{k^2 - \gamma_a^2}, \quad (3.26)$$

а полевые проводимости — вещественные.

Для нераспространяющихся волн ($\gamma_a > k$) постоянные передачи — вещественные величины, а проводимости — мнимые.

Полное поле в волноводе выражается в виде ряда по всем единичным полям:

$$\bar{E} = \sum_a U_a \bar{\mathcal{E}}_a e^{(j\omega t \pm \hat{\gamma}_a z)}, \quad (3.27)$$

$$\bar{H} = \sum_a I_a \bar{\mathcal{H}}_a e^{(j\omega t \pm \hat{\gamma}_a z)}. \quad (3.28)$$

Здесь U_a и I_a — амплитуды полей при соответствующих векторных функциях, они определяются режимом возбуждения волновода.

Ниже приведены скалярные функции ψ_a для прямоугольного, аксиального и круглого волноводов.

Коаксиальная линия. Основным типом волны является поперечная электромагнитная волна, обозначаемая ТЕМ (реже — ЕН). Волны ТЕМ характеризуются тем, что:

1) не имеют критической частоты (конечной критической длины волны);

2) имеют только поперечные составляющие поля;

3) не обладают дисперсией (т. е. фазовая скорость волны не зависит от частоты колебаний).

Коаксиальная линия нормально работает на волне основного типа, если поперечные размеры не соизмеримы с длиной волны. Распространение высших типов возможно в том случае, если средний периметр линии $2\pi(a + b)$ станет равным длине волны ($r_1 = b$ и $r_a = a$ — радиусы проводников линии).

Скалярная собственная функция для волны ТЕМ имеет вид

$$\psi_\lambda = \frac{\ln r}{\sqrt{\frac{2\pi \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2}}}, \quad (3.29)$$

где r — текущий радиус;

r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы (рис. 3.1, a).

Структура поля волны ТЕМ в коаксиальной линии показана на рис. 3.2.

Помимо основного вида колебаний ТЕМ в коаксиальной линии (коаксиальном волноводе) могут возбуждаться поперечные электрические ТЕ-волны (или h -волны) и поперечные магнитные ТМ-волны (или e -волны).

Скалярные собственные функции коаксиального волновода:

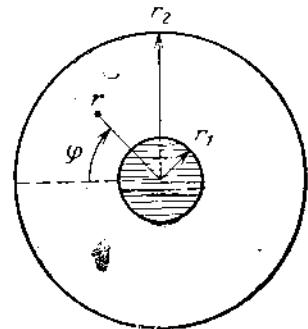


Рис. 3.1а. Коаксиальная линия.

для ТЕ-поля

$$\times \left[\frac{J_m(x_{hmn} r)}{J'_m(x_{hmn} r_1)} - \frac{N'_m(x_{hmn} r)}{N_m(x_{hmn} r_1)} \right] \cos m\varphi, \quad (3.30)$$

$m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, 3, \dots,$

где $J_m(x_{hmn} r)$ — функция Бесселя первого рода m -го порядка;
 $N'_m(x_{hmn} r)$ — функция Неймана.

Критические числа x_{hmn} являются корнями уравнения

$$\frac{J'_m(x_{hmn} r_1)}{N'_m(x_{hmn} r_1)} = \frac{J'_m(x_{hmn} r_2)}{N'_m(x_{hmn} r_2)}. \quad (3.31)$$

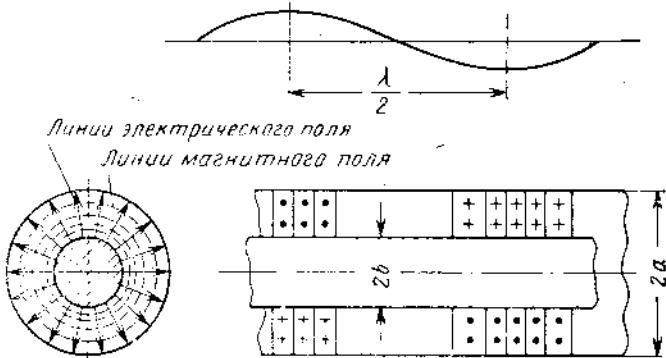


Рис. 3.2. Структура электромагнитного поля волны ТЕМ в коаксиальной линии.

Обозначая $x_{hmn} r_1 = w_{hmn}$ и $\frac{r_2}{r_1} = \xi$, перепишем уравнение (3.31) для определения корней в виде

$$\frac{N'_m(w_{hmn})}{J'_m(w_{hmn})} - \frac{N'_m(\xi w_{hmn})}{J'_m(\xi w_{hmn})} = 0, \quad (3.32)$$

где w_{hmn} определяется по табл. 3.17 а, б.
Нормирующий множитель

$$C_{hmn} = \sqrt{\frac{2}{\pi(1+\delta_{0m})}} \left\{ \left(r_2^2 - \frac{m^2}{x_{hmn}^2} \right) \left[\frac{J'_m(x_{hmn} r_2)}{J'_m(x_{hmn} r_1)} - \frac{N'_m(x_{hmn} r_2)}{N'_m(x_{hmn} r_1)} \right]^2 - \left(r_1^2 - \frac{m^2}{x_{hmn}^2} \right) \left[\frac{J_m(x_{hmn} r_1)}{J'_m(x_{hmn} r_1)} - \frac{N_m(x_{hmn} r_1)}{N'_m(x_{hmn} r_1)} \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.33)$$

где

$$\delta_{0m} = \begin{cases} 1 & \text{при } m = 0, \\ 0 & \text{при } m \neq 0; \end{cases} \quad (3.34)$$

для ТМ-поля

$$\varphi_{emn}(r, \varphi) = C_{emn} \left[\frac{J_m(x_{emn} r)}{J_m(x_{emn} r_1)} - \frac{N_m(x_{emn} r)}{N_m(x_{emn} r_1)} \right] \cos m\varphi. \quad (3.35)$$

Критические числа x_{emn} являются корнями уравнения

$$\frac{J_m(x_{emn} r_1)}{N_m(x_{emn} r_1)} = \frac{J_m(x_{emn} r_2)}{N_m(x_{emn} r_2)}, \quad (3.36)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, 3, \dots$

Таблица 3.17а

Величины ($\xi + 1$) w_{hmn} :

$\xi \backslash mn$	11	21	31	ξ	mn	11	21	31
1,0	2,000	4,000	6,000	1,8	2,024	4,026	5,986	
1,1	2,001	4,001	6,002	2,0	2,031	4,023	5,937	
1,2	2,002	4,006	6,008	2,5	2,048	3,980	5,751	
1,3	2,006	4,011	6,012	3,0	2,056	3,908	5,552	
1,4	2,009	4,015	6,017	3,5	2,057	3,834	5,382	
1,5	2,013	4,020	6,018	4,0	2,055	3,760	5,240	
1,6	2,018	4,025	6,011					

Обозначая $x_{emn} r_1 = w_{emn}$ и $\frac{r_2}{r_1} = \xi$, перепишем уравнение для определения корней в следующем виде:

$$\frac{N_m(w_{emn})}{J_m(w_{emn})} - \frac{N_m(\xi w_{emn})}{J_m(\xi w_{emn})} = 0, \quad (3.37)$$

где w_{emn} определяются по табл. 3.18.

Нормирующий множитель

$$C_{emn} = \sqrt{\frac{2}{\pi(1+\delta_{0m})}} \left\{ r_2^2 \left[\frac{J_{m+1}(x_{emn} r_2)}{J_m(x_{emn} r_1)} - \frac{N_{m+1}(x_{emn} r_2)}{N_m(x_{emn} r_1)} \right]^2 - r_1^2 \left[\frac{J_{m+1}(x_{emn} r_1)}{J_m(x_{emn} r_1)} - \frac{N_{m+1}(x_{emn} r_1)}{N_m(x_{emn} r_1)} \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.38)$$

где δ_{0m} определяется из (3.34).

Таблица 3.176

Величины ($\varepsilon - 1$) Ψ и η :

Логика 3.10

Величины $(\varepsilon - 1) \omega_{min}$.

Приближенные выражения для критических волн [2,12]:
для TE_{mn} -волны при $a - b \ll a$ и $n \geq 2$:

$$(\lambda_{\text{кр}})_{h_{mn}} \approx \frac{2(a-b)}{n-1}; \quad (3.39)$$

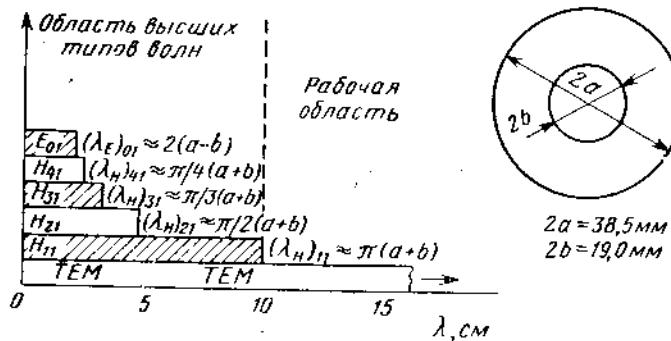


Рис. 3.3. Диаграмма типов волн в коаксиальной линии.

для TE_{ml} -волны, где $m = 1, 2, 3$,

$$(\lambda_{\text{кр}})_{h_{ml}} \approx \frac{\pi(a-b)}{m}. \quad (3.40)$$

Простейшей TE -волной в коаксиальной линии является волна TE_{11}

$$(\lambda_{\text{кр}})_{h11} \approx \pi(a+b), \quad (3.41)$$

для TM_{mn} -волны

$$(\lambda_{\text{кр}})_{emn} \approx \frac{2(a-b)}{n}. \quad (3.42)$$

Простейшей TM -волной в коаксиальной линии является волна TM_{01} , обладающая наименьшей критической частотой из всех волн типа TM .

На рис. 3.3 показаны области существования высших волн в коаксиальной линии с размерами $38,5 \times 19,0 \text{ мм}$.

Структура полей TE - и TM -волн в коаксиальной линии показана на рис. 3.4 и 3.5.

Прямоугольный волновод (рис. 3.6). Все существующие типы волн в волноводе можно разбить на TE_{mn} -волны (h_{mn} -волны) и TM_{mn} -волны (e_{mn} -волны). Индекс m означает число стоячих полу волн поля, укладывающихся по широкой стороне волновода, а индекс n — число таких полу волн по узкой стороне волновода.

Скалярные собственные функции прямоугольного волновода:

для TE -поля

$$\psi_{hmn}(x, y) = C_{hmn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b}, \quad (3.43)$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots; n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

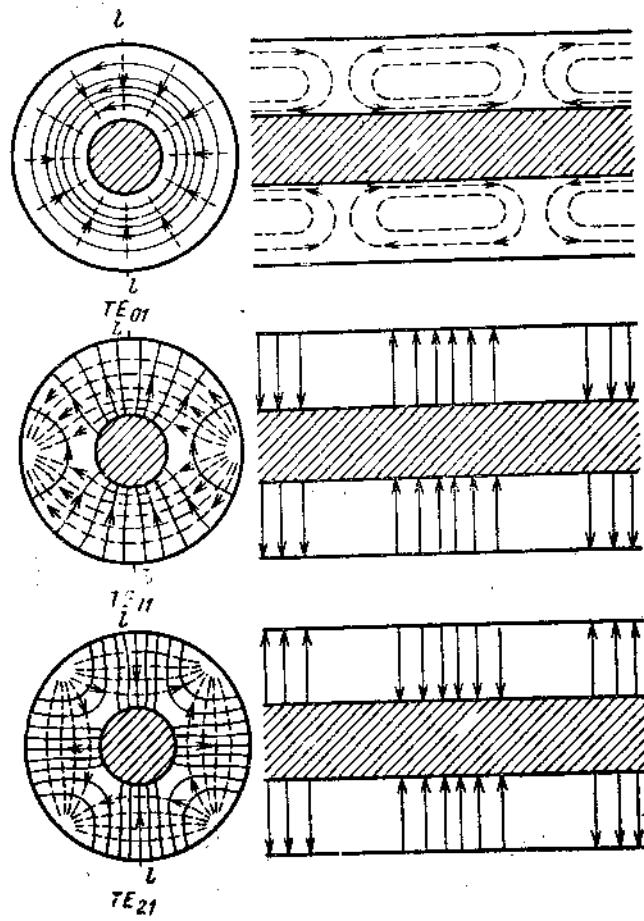


Рис. 3.4. Структура TE -волн в коаксиальной линии:
— электрические силовые линии; — магнитные силовые линии.

(при $m=n=0$ существует магнитная составляющая поля TE_{00} , которую необходимо учитывать при возбуждении волновода);
для TM -поля

$$\psi_{emn}(x, y) = C_{emn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (3.44)$$

$$m = 1, 2, 3, \dots; n = 1, 2, 3, \dots$$

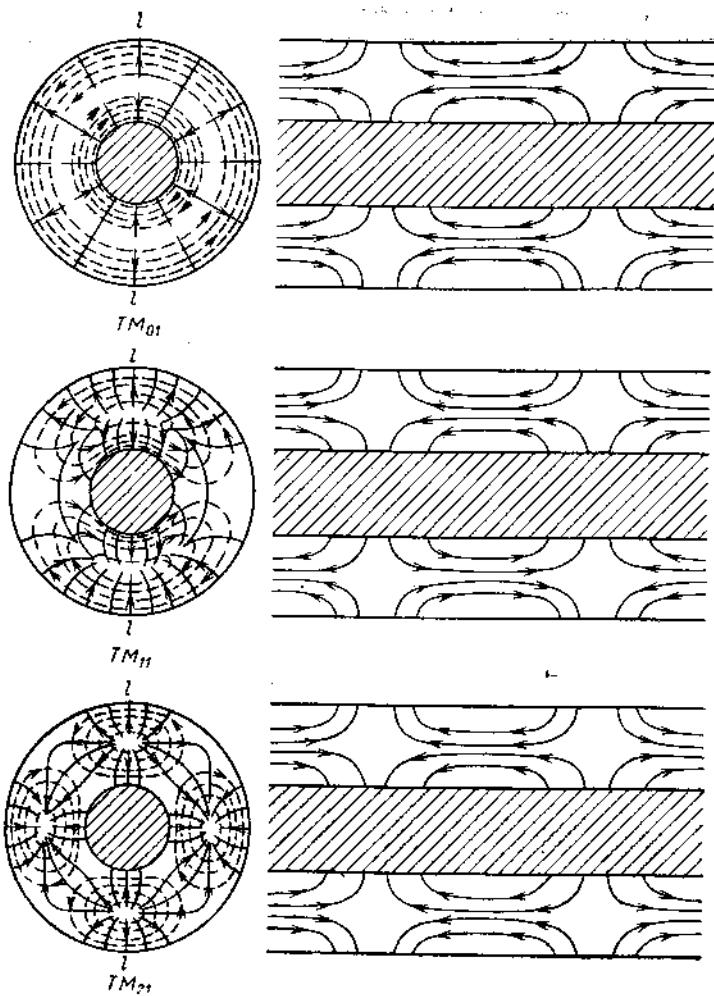


Рис. 3.5. Структура ТМ-волн в коаксиальной линии.

Критические числа для TE- и TM-полей

$$x_{h,e} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (3.45)$$

Нормирующие множители для этих полей

$$C_{h,e} = \sqrt{\frac{(2 - \delta_{0m})(2 - \delta_{0n})}{ab}}, \quad (3.46)$$

где

$$\delta_{0m} = \begin{cases} 1 & \text{при } m = 0, \\ 0 & \text{при } m \neq 0; \end{cases} \quad (3.47)$$

$$\delta_{0n} = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0, \\ 0 & \text{при } n \neq 0. \end{cases} \quad (3.48)$$

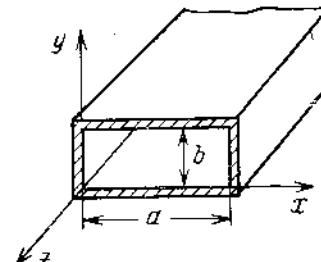


Рис. 3.6. Прямоугольный волновод.

Для волн TE_{mn} составляющие собственных векторов (нормальных волн) определяются формулами:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_x &= -\frac{C_h}{x_h} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{E}_y &= \frac{C_h}{x_h} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{E}_z &= 0, \\ \mathcal{H}_x &= -\frac{C_h}{x_h} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{H}_y &= -\frac{C_h}{x_h} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{H}_z &= C_h \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right). \end{aligned} \quad (3.49)$$

В случае, когда волны имеют обратный порядок индексов TE_{nm}, распределение поля будет одинаковым, за исключением его ориентации по отношению к сторонам волновода, т. е. в этом случае необходимо поменять местами обозначения стенок волновода *a* и *b*.

Постоянная распространения

$$\gamma^2 = k^2 - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right). \quad (3.50)$$

Из формулы (3.50) следует, что γ существенно лишь при условии, если длина волны в воздухе λ и соответствующая ей частота f удовлетворяют неравенствам

$$\lambda \leq \lambda_{kp} = \sqrt{\frac{2}{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (3.51)$$

и

$$f > f_{kp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (3.52)$$

где c — скорость света.

Величины λ_{kp} и f_{kp} являются предельными (критическими) волной и частотой. Таким образом, постоянная распространения равна

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2} = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f^2 - f_{kp}^2} = \frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (3.53)$$

Отсюда следует, что длину волны в волноводе Λ можно вычислить по формуле

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{f^2 - f_{kp}^2}} \geq \lambda. \quad (3.54)$$

Это соотношение можно представить также как

$$\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2 = 1. \quad (3.55)$$

Фазовая скорость распространения волн

$$v = \frac{\omega}{\gamma} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{kp}}{f}\right)^2}} \geq c. \quad (3.56)$$

Групповая скорость (скорость движения энергии)

$$u = \frac{c^2}{v} \leq c. \quad (3.57)$$

Наименьшую критическую частоту (самую большую критическую длину волны) имеет волна TE_{10} , вследствие этого волна TE_{10} (h_{10}) находит наибольшее практическое применение.

На рис. 3.7 приведена структура электромагнитных полей некоторых простейших типов TE_{mn} -волн в прямоугольном волноводе.

Для волны TM_{mn} составляющие собственных векторов (нормальных волн) определяются формулами:

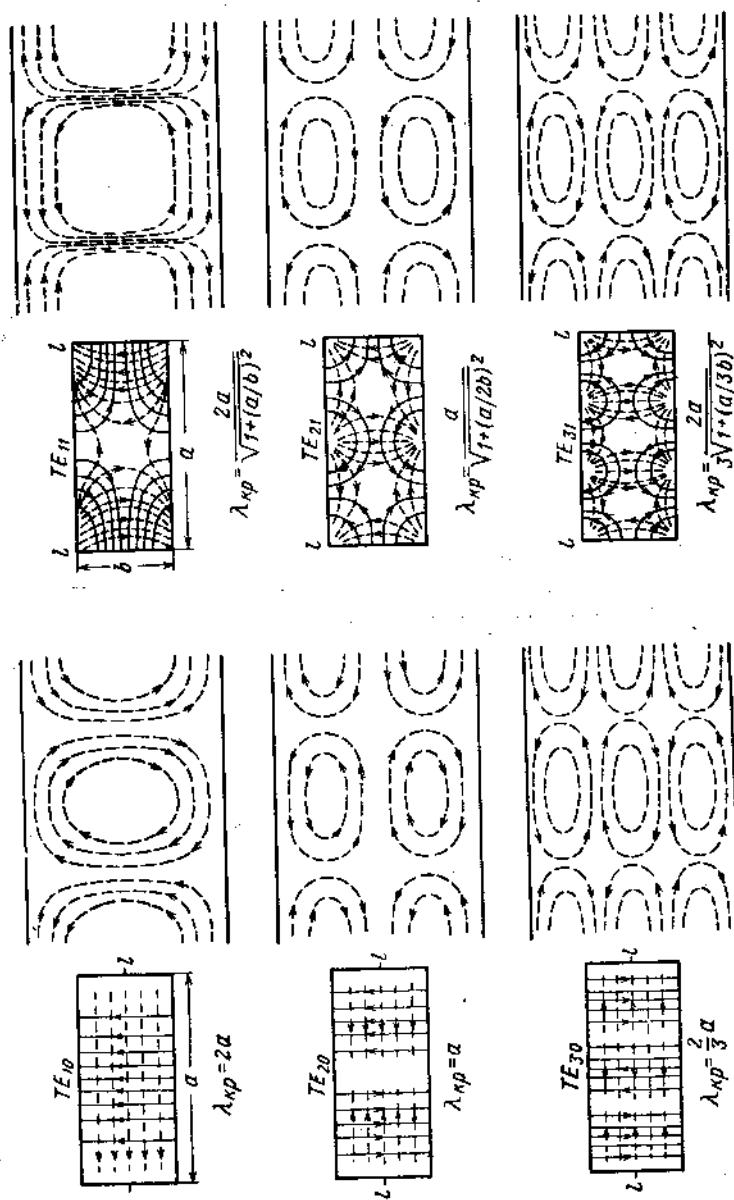


Рис. 3.7. Структура TE -волн в прямоугольном волноводе.

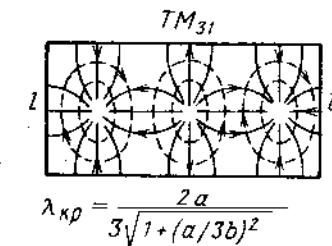
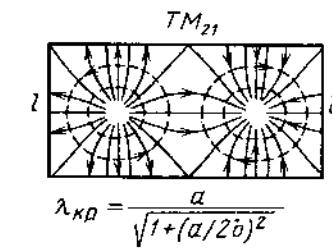
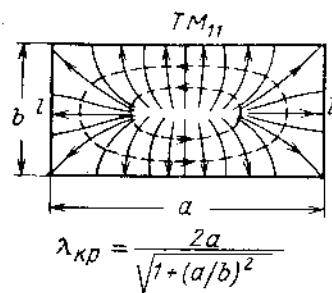
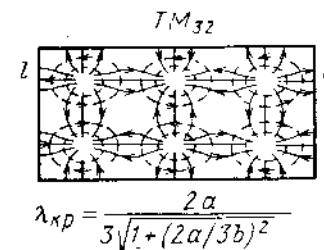
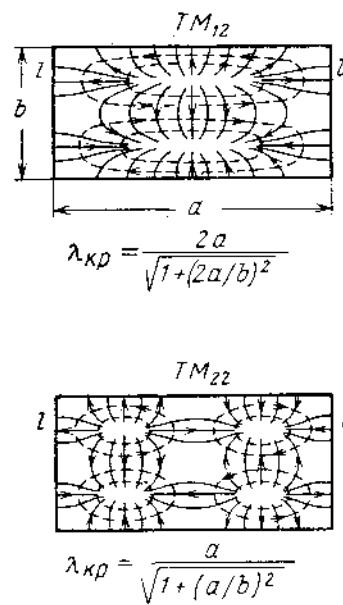


Рис. 3.8. Структура TM -волн



в прямоугольном волноводе.

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_x &= \frac{C_e}{\omega_e} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{E}_y &= \frac{C_e}{\omega_e} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{E}_z &= C_e \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{H}_x &= -\frac{C_e}{\omega_e} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{H}_y &= \frac{C_e}{\omega_e} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \\ \mathcal{H}_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

Выражения для γ , k , λ_{kp} , f_{kp} , Δ , v и a для ТМ- и ТЕ-волн определяются формулами (3.53)–(3.57).

В прямоугольном волноводе наименшим видом колебаний ТМ-волн является TM_{11} . Волны типов TM_{0n} и TM_{0m} невозможны.

Структуры полей TM_{mn} -волн в прямоугольном волноводе показаны на рис. 3.8. Электромагнитное поле TM_{mn} -волн в прямоугольном волноводе является многократным повторением поля TM_{11} -волн, получаемым следующим образом: если сторону a разбить на m частей, а сторону b — на n частей и через соответствующие точки провести прямые, параллельные сторонам прямоугольника, то прямоугольное сечение волновода разобьется на mn одинаковых прямоугольников [18], в которых структуры поля одинаковы.

Рис. 3.9. Круглый волновод.

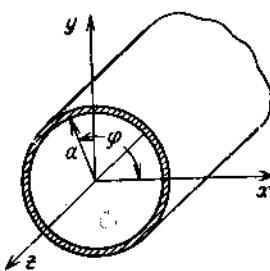
Волноводы круглого сечения. Волноводы круглого сечения легко изготавливаются, однако в связи с тем, что поляризация основного вида колебаний в них неустойчива, они применяются только в специальных случаях, например при использовании волн с круговой поляризацией, при возбуждении волн типа TE_{01} , когда требуется малое затухание.

При рассмотрении структуры поля в круглых волноводах используют цилиндрическую систему координат (рис. 3.9) с началом координат в центре поперечного сечения волновода, с осью вдоль волновода и радиусом $r=a$.

Скалярные собственные функции круглого волновода для ТЕ-поля

$$\psi_{emn}(r, \varphi) = C_{emn} J_m\left(\epsilon_{mn} \frac{r}{a}\right) \cos m\varphi, \quad (3.59)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, 3, \dots,$$



где $J_m\left(\epsilon_{mn} \frac{r}{a}\right)$ — функция Бесселя первого рода;
 ϵ_{mn} являются корнями уравнения $J'_m(\epsilon_{mn}) = 0$.

Критическое волновое число

$$x_{hmn} = \frac{\epsilon_{mn}}{a}. \quad (3.60)$$

Нормирующий множитель

$$C_{hmn} = \frac{\sqrt{2-\delta_{om}}}{a \sqrt{\pi} \sqrt{1 - \frac{m^2}{\epsilon_{mn}^2} J_m(\epsilon_{mn})}}; \quad (3.61)$$

для ТМ-поля

$$\psi_{emn}(r, \varphi) = C_{emn} J_m\left(\epsilon_{mn} \frac{r}{a}\right) \sin m\varphi, \quad (3.62)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, 3, \dots,$$

где ϵ_{mn} являются корнями уравнения $J_m(\epsilon_{mn}) = 0$.

Критическое волновое число

$$x_{emn} = \frac{\epsilon_{mn}}{a}. \quad (3.63)$$

Нормирующий множитель

$$C_{emn} = \frac{\sqrt{2-\delta_{om}}}{a \sqrt{\pi} J'_m(\epsilon_{mn})}. \quad (3.64)$$

Составляющие собственных векторов в круглом волноводе имеют вид:

для TM_{mn} -волны

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_r &= C_{emn} J'_m\left(\frac{\epsilon_{mn}}{a} r\right) \cos m\varphi, \\ \mathcal{E}_\varphi &= -\frac{C_{emn}}{x_{emn}} \frac{m}{r} J_m\left(\frac{\epsilon_{mn}}{a} r\right) \sin m\varphi, \\ \mathcal{E}_z &= C_{emn} J_m\left(\frac{\epsilon_{mn}}{a} r\right) \cos m\varphi, \end{aligned} \right\} \quad (3.65)$$

$$\mathcal{H}_r = \frac{C_{emn}}{x_{emn}} \frac{m}{r} J_m\left(\frac{\epsilon_{mn}}{a} r\right) \sin m\varphi,$$

$$\mathcal{H}_\varphi = C_{emn} J'_m\left(\frac{\epsilon_{mn}}{a} r\right) \cos m\varphi,$$

$$\mathcal{H}_z = 0;$$

для TE_{mn} -волн

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_r &= -\frac{C_{hmn}}{\kappa_{hmn}} \frac{m}{r} J_m\left(\frac{\gamma_{mn}}{a} r\right) \sin m\varphi, \\ \mathcal{E}_\varphi &= -C_{hmn} J'_m\left(\frac{\gamma_{mn}}{a} r\right) \cos m\varphi, \\ \mathcal{E}_z &= 0; \\ \mathcal{H}_r &= C_{hmn} J'_m\left(\frac{\gamma_{mn}}{a} r\right) \cos m\varphi, \\ \mathcal{H}_\varphi &= -\frac{C_{hmn}}{\kappa_{hmn}} \frac{m}{r} J_m\left(\frac{\gamma_{mn}}{a} r\right) \sin m\varphi, \\ \mathcal{H}_z &= C_{hmn} J_m\left(\frac{\gamma_{mn}}{a} r\right) \cos m\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

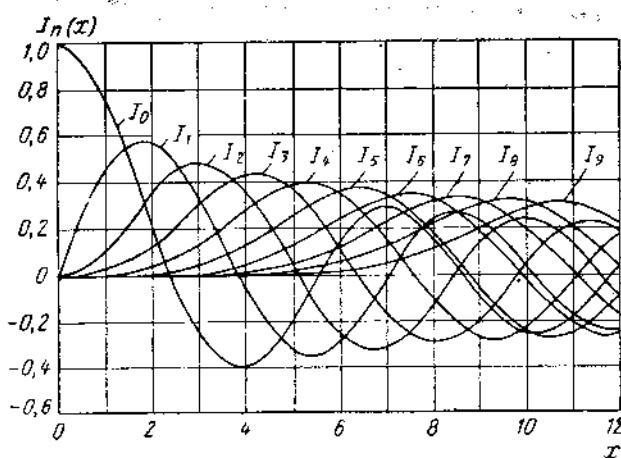


Рис. 3.10. График функций Бесселяя.

Через ϵ_{mn} и γ_{mn} обозначены значения корней бесселевых функций m -го порядка и соответственно их производных; индекс m указывает порядок бесселевой функции и определяет число стоячих волн поля, укладывающихся вдоль окружности волновода; индекс n соответствует номеру корня и определяет число «половин» поля, укладывающихся вдоль радиуса волновода.

Значения корней бесселевых функций и их производных определяются из специальных таблиц [15] (табл. 3.19 и 3.20) или из графиков бесселевых функций на рис. 3.10.

Таблица 3.19

Корни функций Бесселя ϵ_{mn}

n	m					
	0	1	2	3	4	5
1	2,405	3,832	5,136	6,380	7,588	8,772
2	5,520	7,016	8,417	9,761	11,065	12,339
3	8,654	10,173	11,620	13,015	14,372	15,700
4	11,792	13,324	14,796	16,223	17,616	18,980
5	14,931	16,471	17,960	19,409	20,827	22,218
6	18,071	19,616	21,117	22,583	24,019	25,430

Таблица 3.20

Корни производных функций Бесселя γ_{mn}

n	m					
	0	1	2	3	4	5
1	3,832	1,841	3,054	4,201	5,317	6,416
2	7,016	5,331	6,706	8,015	9,282	10,520
3	10,173	8,536	9,965	11,344	12,682	13,987
4	13,324	11,706	12,170	—	—	—

Выражения для постоянной распространения:
для ТЕ-волн

$$\gamma = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\gamma_{mn}}{a}\right)^2}; \quad (3.67)$$

для ТМ-волн

$$\gamma = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\epsilon_{mn}}{a}\right)^2}. \quad (3.68)$$

Критические длины волн в круглом волноводе:
для ТЕ-волн

$$\lambda_{kp} = \frac{2\pi}{\gamma_{mn}} a; \quad (3.69)$$

для ТМ-волн

$$\lambda_{kp} = \frac{2\pi}{\epsilon_{mn}} a. \quad (3.70)$$

Значения критических длин волн в круглом волноводе для волн типа TE_{mn} приведены в табл. 3.21, а для волн типа TM_{mn} — в табл. 3.22 [19].

Таблица 3.21

Значения $\lambda_{\text{кр}}/\alpha$ в круглом волноводе для волн типа TE_{mn}

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,639788	0,895604	0,617605	0,471580	0,381478	0,320312	0,276062	0,242560
1	3,412586	1,178516	0,736053	0,536749	0,422723	0,348766	0,296875	0,258447
2	2,057201	0,936932	0,630243	0,477069	0,384351	0,322002	0,277139	0,243289
3	1,495573	0,783905	0,553785	0,430774	0,352112	0,299592	0,260228	—
4	1,181594	0,676892	0,495445	0,393582	0,327317	0,280487	0,245535	—
5	0,979357	0,597267	0,449210	0,365372	0,263959	—	—	—
6	0,837616	0,535427	0,411521	0,337128	0,286489	0,244492	—	—
7	0,732490	0,485848	0,380122	0,315075	0,270034	—	—	—
8	0,651281	0,445127	0,353504	0,295970	0,255547	—	—	—
9	0,586589	0,411023	0,330614	0,279235	0,242676	—	—	—
10	0,533790	0,382905	0,310565	0,264436	—	—	—	—
11	0,489860	0,356993	0,293183	0,2511242	—	—	—	—
12	0,452718	0,335191	0,277657	0,239396	—	—	—	—
13	0,420888	0,316005	0,263784	—	—	—	—	—
14	0,393304	0,298980	0,251307	—	—	—	—	—
15	0,369158	0,283765	0,240020	—	—	—	—	—
16	0,347843	0,270078	—	—	—	—	—	—
17	0,328885	0,257699	—	—	—	—	—	—
18	0,311912	0,246442	—	—	—	—	—	—
19	0,296624	—	—	—	—	—	—	—
20	0,282783	—	—	—	—	—	—	—

6
Зак. 782

Таблица 3.22

Значения $\lambda_{\text{кр}}/\alpha$ в круглом волноводе для волн типа TM_{mn}

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8
0	2,612705	1,138242	0,726067	0,532856	0,420817	0,347693	0,286214	0,258010
1	1,639788	0,895604	0,617605	0,41580	0,38478	0,320312	0,276062	0,242460
2	1,223452	0,746466	0,540729	0,424656	0,348847	0,297542	0,258886	—
3	0,984800	0,643702	0,482757	0,387290	0,323718	0,278230	0,244025	—
4	0,828005	0,567858	0,437166	0,356676	0,301686	0,261592	0,247074	—
5	0,716320	0,509230	0,400198	0,331040	0,282800	—	—	—
6	0,633259	0,462333	0,369517	0,309200	0,266394	—	—	—
7	0,566647	0,423930	0,343576	0,290330	0,251984	—	—	—
8	0,513958	0,391774	0,321317	0,273834	—	—	—	—
9	0,470499	0,364429	0,301975	0,259273	—	—	—	—
10	0,434057	0,340857	0,284990	0,246309	—	—	—	—
11	0,403032	0,320309	0,269944	—	—	—	—	—
12	0,376279	0,302223	0,256510	—	—	—	—	—
13	0,352960	0,286169	0,244433	—	—	—	—	—
14	0,332444	0,271813	—	—	—	—	—	—
15	0,314247	0,258895	—	—	—	—	—	—
16	0,297992	0,247204	—	—	—	—	—	—
17	0,283377	—	—	—	—	—	—	—
18	0,270166	—	—	—	—	—	—	—
19	0,255861	—	—	—	—	—	—	—
20	0,247203	—	—	—	—	—	—	—

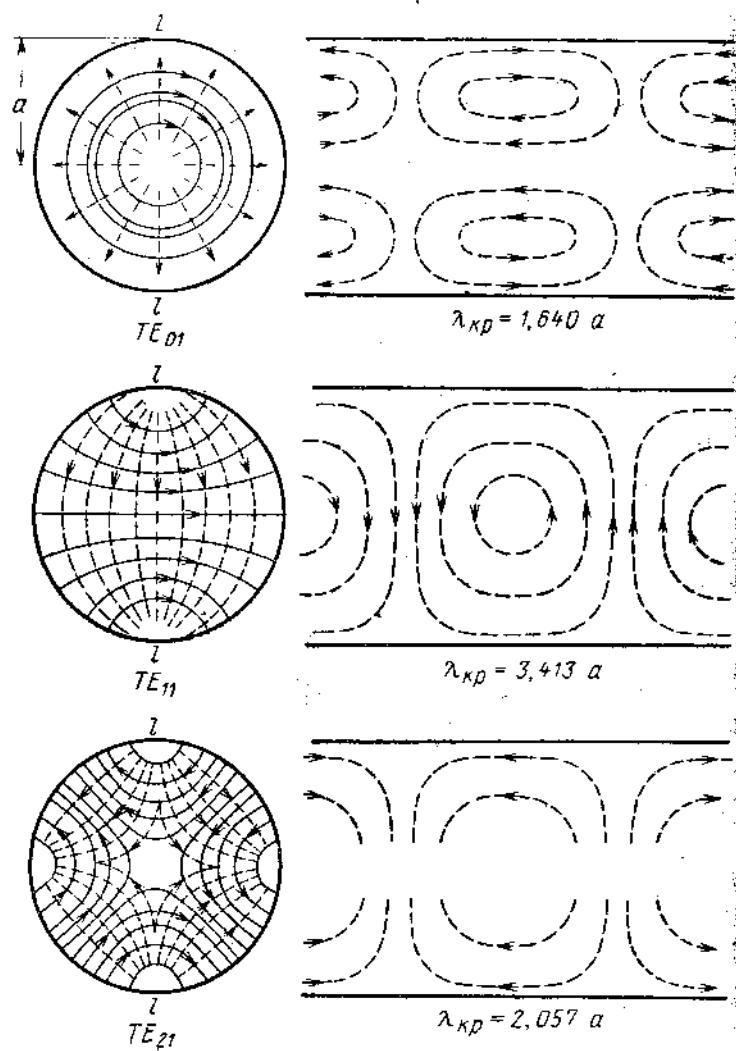
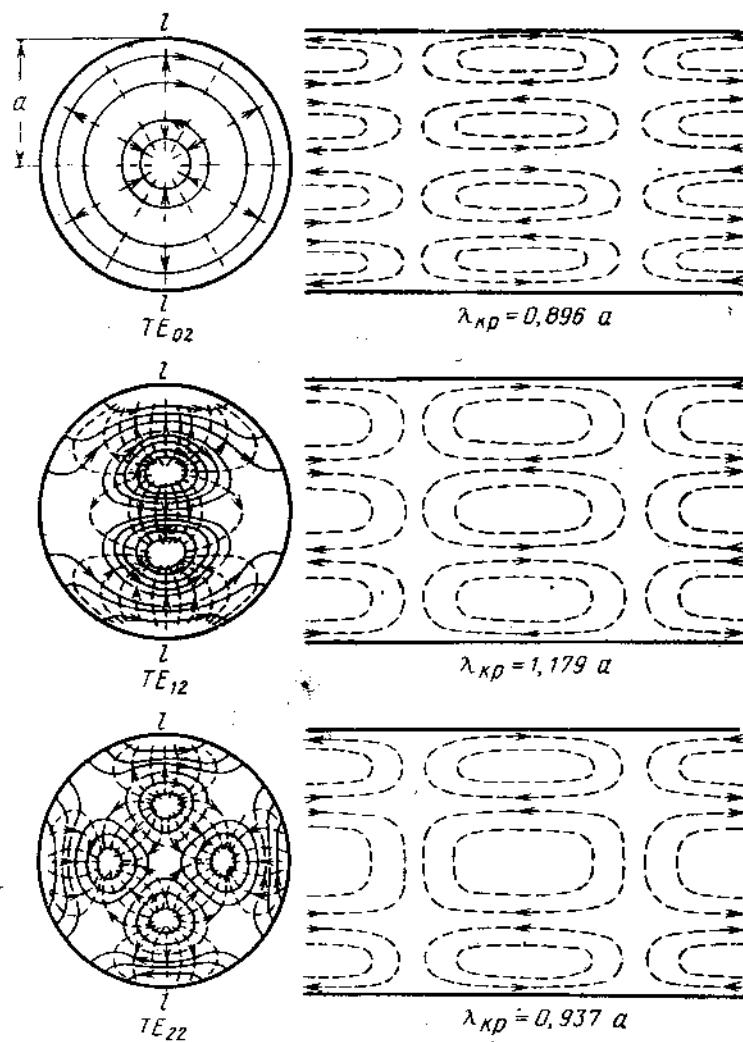


Рис. 3.11. Структура ТЕ-волны



в круглом волноводе.

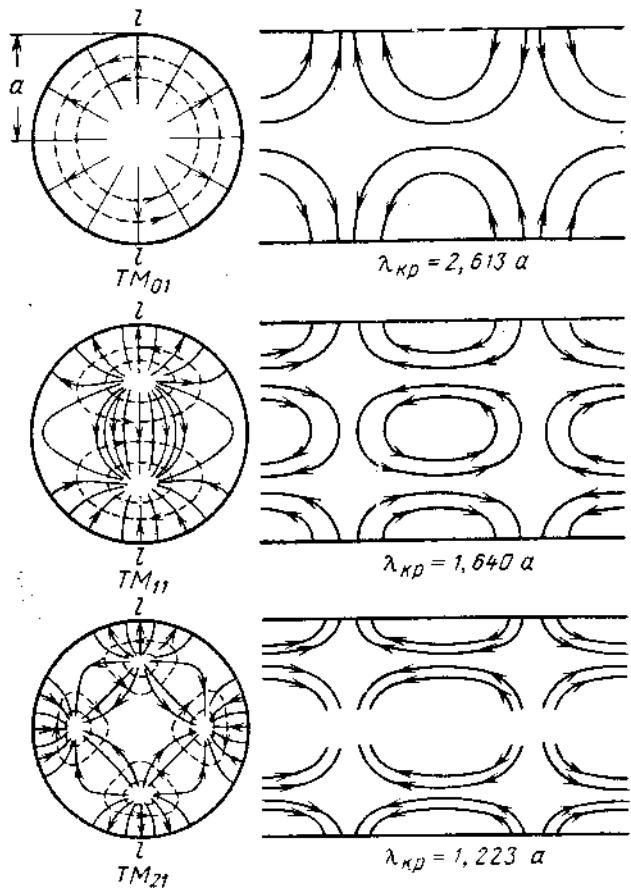


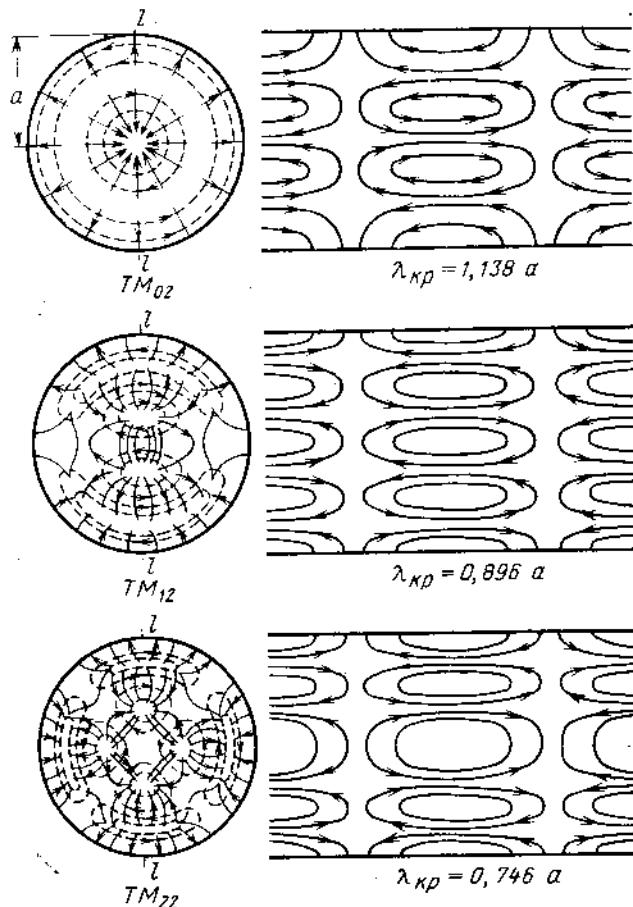
Рис. 3.12. Структура ТМ-волн

Наибольшие критические длины волн:
для TE-волн

$$(\lambda_{kp})_{h11} = \frac{2\pi}{1,841} a = 3,413 a; \quad (3.71)$$

для TM-волн

$$(\lambda_{kp})_{e01} = \frac{2\pi}{2,405} a = 2,613 a. \quad (3.72)$$



в круглом волноводе.

Структуры полей простейших TE_{mn} и TM_{mn}-волн в круглом волноводе приведены на рис. 3.11 и 3.12.

Волна TE₀₁ не возбуждается в металлических стенах круглого волновода токов, текущих вдоль продольной координаты; затухание этой волны неограниченно уменьшается по мере увеличения частоты.

Волна TE₀₁ в круглых волноводах используется в линиях передач для дальней волноводной связи [16].

3.7. П- И Н-ВОЛНОВОДЫ

П- и Н-волноводы представляют собой прямоугольные волноводы с одним или двумя продольными выступами. Картинка поля в поперечном сечении П- и Н-волноводов показана на рис. 3.13, а, б.

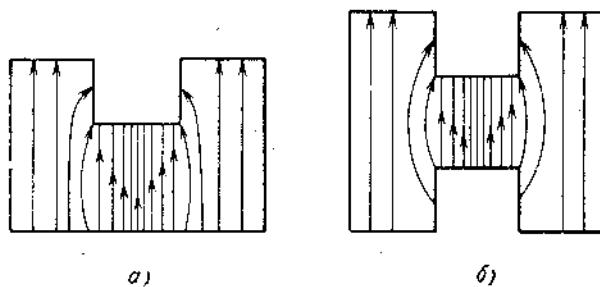


Рис. 3.13. Структура поля в поперечном сечении:
а — П-волновода, б — Н-волновода.

Электрическое и магнитное поля концентрируются в основном между концом выступа и стенкой для П-волновода и между концами выступов в Н-волноводе. По сравнению с прямоугольными волноводами, П- и Н-волноводы имеют более низкую критическую частоту (т. е. более широкую полосу частот) и более низкое волновое сопротивление при одинаковых внешних размерах. Если соотношение геометрических размеров П-и Н-волновод соответствует рис. 3.14, а, б, то между параметрами волноводов имеют место следующие соотношения:

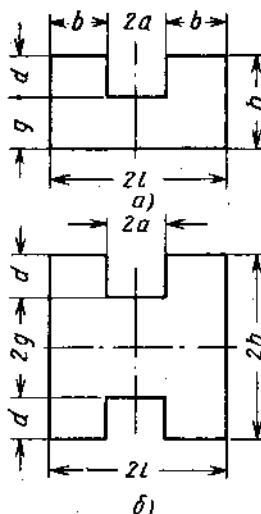


Рис. 3.14. П- и Н-волноводы.

1. Критические частоты одинаковы.

2. Волновое сопротивление Н-волновода вдвое больше волнового сопротивления П-волновода.

3. Коэффициент затухания Н-волновода меньше, чем у П-волновода.

Для определения критической частоты П- и Н-волноводов используются графики рис. 3.15, а, б, в [17], выражающие зависимость фактора понижения критической частоты η от отношения высоты выступа к высоте волновода d/h для ряда фиксированных значений отношения ширины выступа к ширине волновода a/l . Фактор понижения критической частоты η показывает, во сколько раз критические частоты П- и Н-волноводов (f_{kp}) меньше критической частоты прямоугольного волновода с основным типом колебаний

$$\eta_{kp} = \frac{c}{2a}, \text{ т. е.}$$

$$\eta = \frac{f_{kp}}{f_{kp}} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{f_{kp} l}{7500}$$

где f_{kp} — выражена в мегагерцах, а l — в сантиметрах.

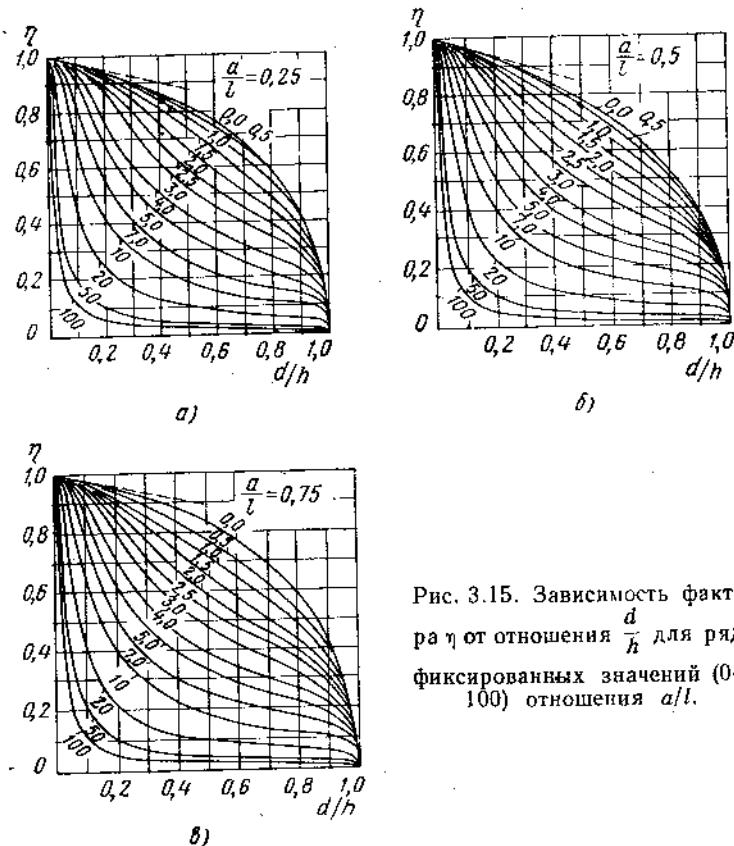
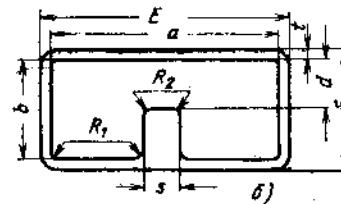


Рис. 3.15. Зависимость фактора понижения критической частоты от отношения d/h для ряда фиксированных значений a/l .

Графики на рис. 3.15, а, б, в построены для трех фиксированных значений: а) $a/l = 0,25$; б) $a/l = 0,5$; в) $a/l = 0,75$.

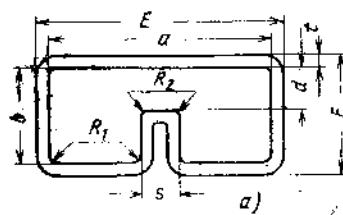
Конструктивные и электрические данные П-волноводов [32] с полосой пропускания 2,4 : 1 даны в табл. 3.23, а с полосой пропускания 3,6 : 1 — в табл. 3.24. Конструктивные и электрические данные Н-волноводов [32] с полосой пропускания 2,4 : 1 даны в табл. 3.25, а с полосой пропускания 3,6 : 1 — в табл. 3.26.

Таблица 3.23

П-волноводов с полосой пропускания 2,4:1
дарта [32].

Рабочий диапазон частот, Гц	Критическая частота, Гц, для волн	Внутренние размеры					Размеры выступа	Внешние размеры			Номинальная толщина стенки, $f = \sqrt{3}f_{kp}H_{10}$	Затухание, дБ/м	Рис.					
		от	до	H_{10}	H_{20}	ширина a	высота b	допуск на a и b	максимальный внутренний радиус R_1	ширина E	высота F	допуск на E и F						
0,175	0,42	0,148	0,431	714,48	321,51	0,508	—	—	134,06	110,74	0,254	26,82	—	—	—	0,256	0,00079	а
0,267	0,64	0,226	0,658	467,89	210,54	0,381	—	—	87,81	72,52	0,178	17,55	—	—	—	0,392	0,0015	а
0,42	1,0	0,356	1,036	297,05	133,68	0,254	1,19	55,75	46,05	0,127	11,15	303,40	140,03	0,381	3,18	0,616	0,0029	а
0,64	1,53	0,542	1,577	195,12	87,81	0,254	1,19	36,627	30,251	0,102	7,32	201,47	94,16	0,381	3,18	0,939	0,0054	а
0,84	2,0	0,712	2,072	148,51	66,83	0,127	1,19	27,864	23,012	0,076	5,56	152,58	70,89	0,254	2,03	1,232	0,0081	а
1,5	3,6	1,271	3,699	83,210	37,440	0,102	1,19	15,621	12,903	0,064	5,41	87,27	41,50	0,229	2,03	2,201	0,0194	а
2,0	4,8	1,695	4,933	62,382	28,067	0,102	1,19	11,709	9,677	0,051	2,34	66,45	32,13	0,229	2,03	2,936	0,03	а
3,5	8,2	2,966	8,632	35,662	16,053	0,076	0,79	6,706	5,537	0,038	1,35	38,91	19,30	0,203	1,63	5,145	0,07	а
4,75	11,0	4,025	11,714	26,264	11,811	0,076	0,79	4,928	4,064	0,025	0,991	28,80	14,35	0,203	1,27	6,974	0,11	а
7,5	18,0	6,356	18,498	16,637	7,493	0,064	0,38	3,124	2,578	0,025	0,635	19,18	10,03	0,190	1,27	11,020	0,22	б
11,0	26,5	9,322	27,130	11,344	5,105	0,051	0,38	2,128	1,758	0,013	0,432	13,39	7,14	0,178	1,02	16,150	0,39	б
18,0	40,0	15,254	44,393	6,939	3,119	0,025	0,38	1,300	1,074	0,013	0,254	8,97	5,16	0,152	1,02	26,410	0,81	б

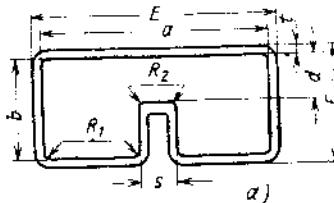
Устанавливается в центре размера a с допуском, соответствующим допуску ± 1 на H_{10} . Рекомендуемый рабочий диапазон частот от $1,18f_{kp}$ основного вида волны приблизительно равен $\frac{1}{800}$ от номинальной ширины с абсолютными затуханиями, приведенными в таблицах, давы для медного волновода со

Конструктивные и электрические данные
(проект стан)

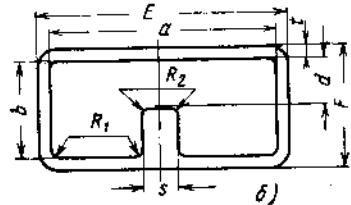
Рабочий диапазон частот, Гц	Критическая частота, Гц, для волн	Внутренние размеры					Размеры выступа
		ширина a	высота b	допуск на a и b	максимальный внутренний радиус R_1	расстояние d	
0,175	0,42	0,148	0,431	714,48	321,51	0,508	—
0,267	0,64	0,226	0,658	467,89	210,54	0,381	—
0,42	1,0	0,356	1,036	297,05	133,68	0,254	1,19
0,64	1,53	0,542	1,577	195,12	87,81	0,254	1,19
0,84	2,0	0,712	2,072	148,51	66,83	0,127	1,19
1,5	3,6	1,271	3,699	83,210	37,440	0,102	1,19
2,0	4,8	1,695	4,933	62,382	28,067	0,102	1,19
3,5	8,2	2,966	8,632	35,662	16,053	0,076	0,79
4,75	11,0	4,025	11,714	26,264	11,811	0,076	0,79
7,5	18,0	6,356	18,498	16,637	7,493	0,064	0,38
11,0	26,5	9,322	27,130	11,344	5,105	0,051	0,38
18,0	40,0	15,254	44,393	6,939	3,119	0,025	0,38

Примечания: 1. Все размеры даны в миллиметрах. 2. Выступ s . 3. Эксцентриситет не должен превышать 10% от толщины стенки (H_{10}) до $0,98 f_{kp}$ следующего вида волн (H_{20}). 4. Допуски на ширину и высоту минимум 0,025 мм и абсолютный максимум 0,5 мм. 6. Величины стандартным удельным сопротивлением $\rho_0 = 1,7241 \cdot 10^{-8}$ ом·м.

Таблица 3.24

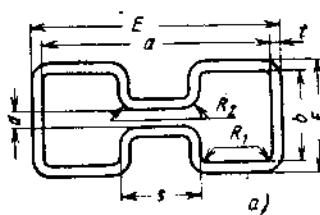
Конструктивные и электрические данные
(проект станции)

Рабочий диапазон частот, Гц		Критическая частота, Гц для волн		Внутренние размеры				Размеры	
от	до	H_{10}	H_{20}	ширина a	высота b	допуск на a и b \pm	максимальный внутренний радиус R_1	расстояние d	допуск на d \pm
0,108	0,39	0,092	0,404	792,94	356,82	0,508	—	61,011	0,102
0,27	0,97	0,229	1,006	318,57	143,87	0,254	—	24,511	0,076
0,39	1,4	0,331	1,454	220,40	99,19	0,254	1,19	16,967	0,064
0,97	3,5	0,822	3,611	88,748	39,929	0,102	1,19	6,833	0,038
1,4	5,0	1,186	5,210	61,519	27,686	0,102	1,19	4,724	0,025
3,5	12,4	2,966	13,030	24,587	11,074	0,076	0,79	1,905	0,013
5,0	18,0	4,237	18,613	17,221	7,747	0,064	0,38	1,321	0,013
12,4	40,0	10,508	46,162	6,934	3,124	0,025	0,38	0,533	0,013

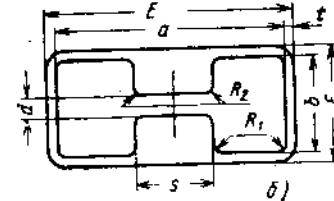
¹ См. примечания к табл. 3.23.П-волноводов¹ с полосой пропускания 3,6:1
дарта [32])

выступа	внешние размеры			Номинальная толщина стекки t	Затухание дБ/м	Рис.
	ширина s	допуск на s \pm	радиус выступа R_1	ширина E	высота F	
134,80	0,254	12,19	—	—	—	0,159
54,15	0,178	4,90	—	—	—	0,397
37,465	0,127	3,40	226,75	105,54	0,381	0,574
15,088	0,064	1,37	92,81	43,99	0,229	1,423
10,465	0,051	0,940	65,58	31,75	0,229	2,055
4,191	0,025	0,381	27,13	13,61	0,203	5,150
2,921	0,025	0,254	19,76	10,29	0,190	7,340
1,168	0,013	0,102	8,97	5,16	0,152	18,250

Таблица 3.25

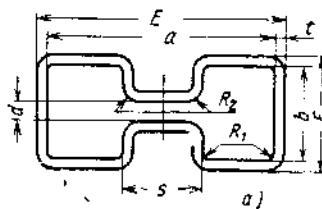
Конструктивные и электрические данные
(проект станции)

Рабочий диапазон частот, Гц	Критическая частота, Гц для волны		Внутренние размеры			Размеры		
	от	до	H_{10}	H_{20}	ширина a	высота b	допуск на a и $b \pm$ максимальный радиус R_1	расстояние между выступами d
0,175	0,42	0,148	0,435	753,54	350,39	0,508	—	148,92
0,267	0,64	0,226	0,664	493,47	229,46	0,381	—	97,51
0,42	1,0	0,356	1,047	313,26	145,72	0,254	1,27	61,90
0,64	1,53	0,542	1,593	205,74	95,68	0,254	1,27	40,665
0,84	2,0	0,712	2,093	156,64	72,85	0,127	1,27	30,963
1,5	3,6	1,271	3,736	87,757	40,818	0,102	1,27	17,348
2,0	4,8	1,695	4,984	65,786	30,607	0,102	1,27	13,005
3,5	8,2	2,966	8,722	37,592	17,475	0,076	0,76	7,417
4,75	11,0	4,025	11,842	27,686	12,852	0,076	0,76	5,461
7,5	18,0	6,356	18,680	17,551	8,153	0,064	0,51	3,454
11,0	26,5	9,322	27,406	11,963	5,563	0,051	0,38	2,362
18,0	40,0	15,254	44,820	7,315	3,404	0,025	0,38	1,448

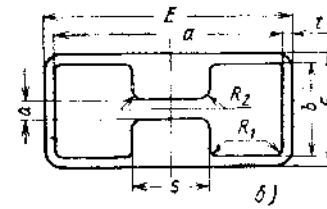
¹ См. примечания к табл. 3.23.Н-волноводов¹ с полосой пропускания 2,4:1
дарта [32])

выступа	внешние размеры			номинальная толщина стекки t	затухание, дБ/м	пос.
	ширина s	допуск на $s \pm$	радиус выступа R_s			
188,39	0,254	29,79	—	—	0,256	0,00075 а
123,37	0,178	19,51	—	—	0,392	0,0014 а
78,31	0,127	12,37	319,61	152,07	0,381	3,18 0,616 0,0028 а
51,435	0,102	8,13	212,09	102,03	0,381	3,18 0,939 0,0053 а
39,167	0,076	6,20	162,99	79,20	0,254	3,18 1,232 0,0079 а
21,946	0,064	3,48	91,82	44,88	0,229	2,03 2,201 0,019 а
16,459	0,051	2,59	69,85	34,67	0,229	2,03 2,936 0,029 а
9,398	0,038	1,47	40,84	20,73	0,203	1,63 5,145 0,067 а
6,909	0,025	1,092	30,23	15,39	0,203	1,27 6,974 0,106 а
4,394	0,025	0,686	18,82	10,69	0,190	1,27 11,020 0,210 а
2,997	0,013	0,483	14,00	7,60	0,178	1,02 16,150 0,374 б
1,829	0,013	0,279	9,35	5,44	0,152	1,02 26,410 0,78 б

Таблица 3.26

Конструктивные и электрические данные
(проект стан

Рабочий диапазон частот, Ггц		Критическая частота, Ггц, для волн		Внутренние размеры				Размеры	
от	до	H ₁₀	H ₂₀	ширина a	высота b	допуск на d и b ±	максимальный внутренний радиус R ₁	расстояние d	допуск на d ±
0,108	0,39	0,092	0,401	879,80	378,31	0,508	—	73,76	0,127
0,27	0,97	0,229	0,999	353,47	151,99	0,254	—	29,642	0,076
0,39	1,4	0,331	1,444	244,55	105,16	0,254	1,27	20,498	0,064
0,97	3,5	0,822	3,587	98,476	42,342	0,102	1,27	8,255	0,038
1,4	5,0	1,186	5,176	68,250	29,337	0,102	1,27	5,715	0,025
3,5	12,4	2,966	12,944	27,280	11,735	0,076	0,76	2,286	0,013
5,0	18,0	4,237	18,490	19,101	8,204	0,064	0,51	1,600	0,013
12,4	40,0	10,508	45,857	7,696	3,302	0,025	0,38	0,635	0,013

Н-волноводов¹ с полосой пропускания 3,6:1
дарта [32])

внешние размеры выступа			внешние размеры			затухание, дБ/м		рис.
ширина s	допуск на s ±	радиус выступа R ₂	ширина E	высота F	допуск на E и F ±	номинальная толщина стекки t	на частоте f = $\sqrt{3}f_{крH_{10}}$	
219,96	0,254	14,76	—	—	—	—	0,159	0,005 а
88,37	0,127	5,92	—	—	—	—	0,397	0,018 а
61,138	0,102	4,09	250,90	111,51	0,381	3,17	0,574	0,032 а
24,613	0,064	1,65	102,54	46,41	0,229	2,03	1,423	0,124 а
17,069	0,051	1,143	72,31	33,40	0,229	2,03	2,055	0,215 а
6,833	0,038	0,457	29,82	14,27	0,203	1,27	5,150	0,85 а
4,775	0,033	0,330	21,64	10,74	0,190	1,27	7,340	1,45 б
1,930	0,013	0,127	9,73	5,33	0,152	1,02	18,250	5,7 б

¹ См. примечания к табл. 3.23.

3.8. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ВХОДЕ ДЛИННОГО ТРАКТА¹

Коэффициент отражения на входе длинного тракта Γ_{Σ} зависит от амплитуды и фазы колебаний, отраженных от каждой неоднородности в тракте (фланцы, изгибы и др.). Как показывает опыт, одинаковые элементы тракта, изготовленные с допусками, приемлемыми для серийного производства, имеют сравнительно небольшой разброс по модулю коэффициента отражения и значительный разброс по фазе отраженной волны (фаза зависит не только от свойств данного элемента, но и от длины участка тракта от входа линии до рассматриваемого элемента).

Ожидаемый модуль суммарного коэффициента отражения на входе длинного тракта (в предположении, что фазы местных коэффициентов отражения подчиняются закону равной вероятности) определяется по формуле

$$|\Gamma_{\Sigma}| \leq x \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |\Gamma_i|^2}, \quad (3.73)$$

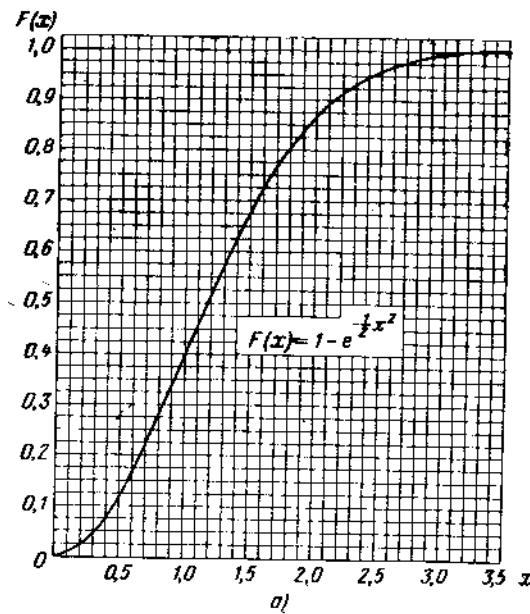


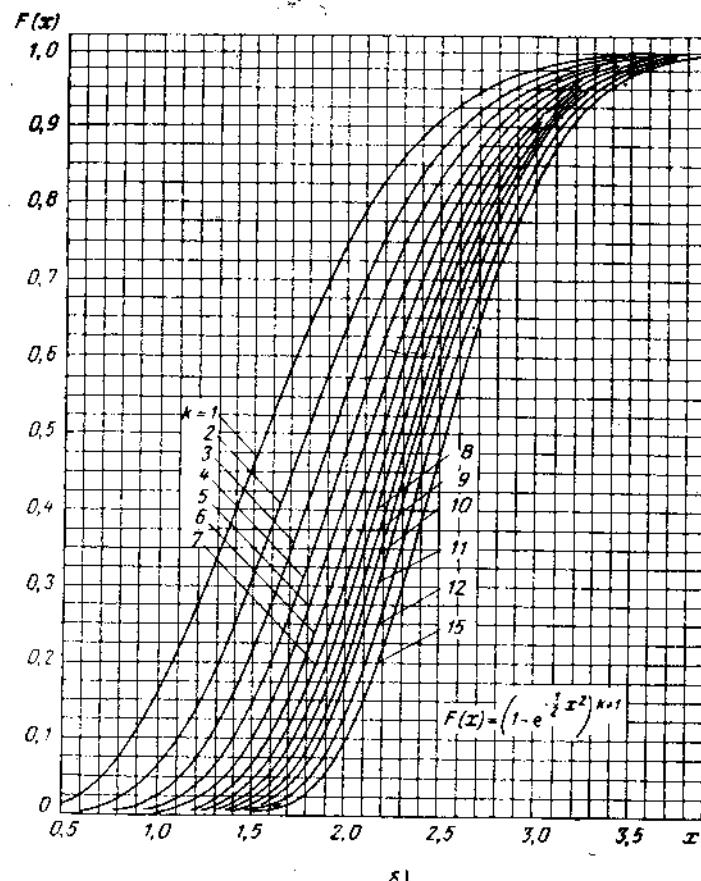
Рис. 3.16. Зависимость параметра

где $|\Gamma_i|$ — модуль коэффициента отражения от i -й неоднородности; x — параметр, определяемый по графику, изображенному на рис. 3.16, а, б.

Величина $F(x)$, отложенная по оси ординат на рис. 3.16а, означает вероятность появления модуля суммарного коэффициента отражения при исследовании на фиксированной частоте множества экземпляров одного и того же тракта.

Пример. Определить с вероятностью 0,9 модуль коэффициента отражения на входе тракта, содержащего десять неоднородностей ($n = 10$), каждая с коэффициентом бегущей волны 0,95.

При КБВ = 0,95 $|\Gamma_i| = |\Gamma| = 0,025$ (см. график рис. 3.17, а). По кривой на рис. 3.16, а при $F(x) = 0,9$ находим $x = 2,16$, откуда



х от вероятности $F(x)$.

¹ Здесь использованы некоторые результаты работ М. С. Грудына.

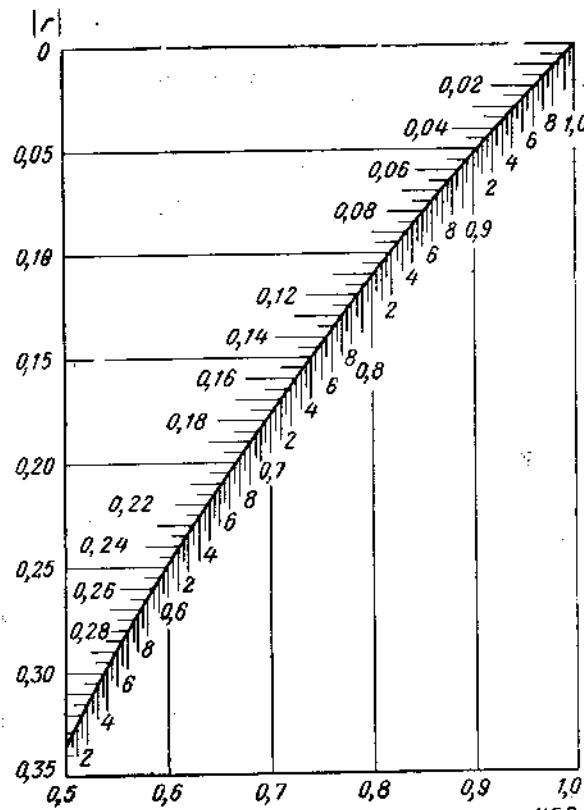
$$|\Gamma_{\Sigma}| \leq 2,16 \sqrt{5 \cdot 0,025^2} = 0,12,$$

т. е. КБВ $\geq 0,78$ (по графику на рис. 3.17). Этот результат следует понимать так: у 90 экземпляров из 100 одинаковых по конструкции трактов КБВ будет не менее 0,78 на одной фиксированной частоте.

При работе в полосе частот ожидаемый коэффициент отражения на входе тракта всегда будет ниже, чем при работе на одной частоте. Расчет отличается от предыдущего случая лишь иным характером зависимости $F(x)$; семейство соответствующих кривых представлено на рис. 3.16, б. Основная расчетная формула по-прежнему (3.73).

Параметр k в семействе кривых 3.16, б вычисляется по формуле

$$k = 2 \frac{2\Delta f}{f_0} \frac{l}{\lambda_{cp}}, \quad (3.74)$$



a)

Рис. 3.17. Графики КБВ

где $2 \frac{\Delta f}{f_0}$ — рабочая полоса частот;

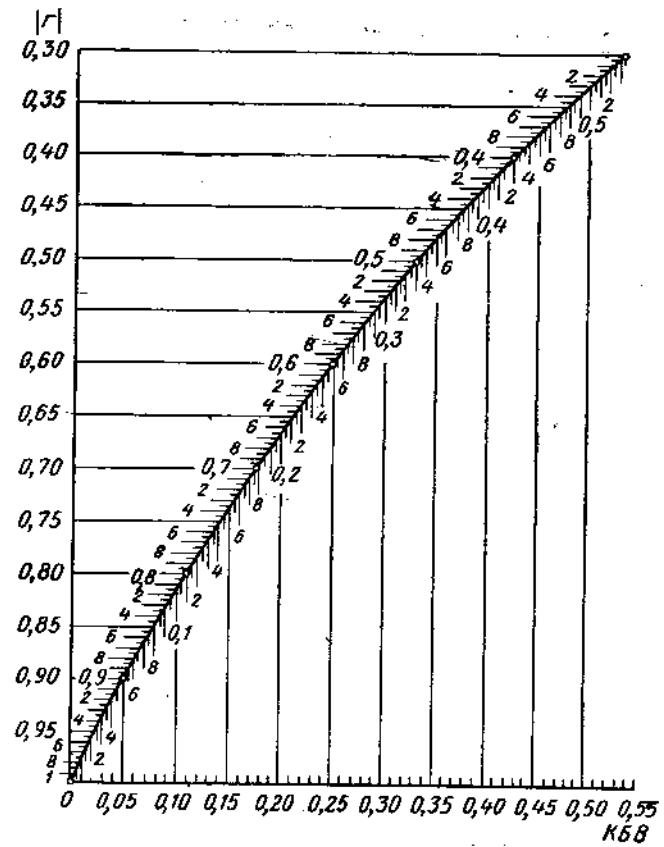
l — полная длина тракта;

λ_{cp} — средняя длина волны в тракте (в двухпроводной или коаксиальной линиях).

Если окажется, что k , подсчитанное по формуле (3.74), больше n , то следует принять $k = n$.

В случае волноводного тракта параметр k вычисляется по формуле

$$k = 2 \frac{2\Delta f}{f_0} \frac{l}{\lambda_{cp}} \left(\frac{\Delta \lambda_{cp}}{\lambda_{cp}} \right)^2. \quad (3.75)$$



б)

и коэффициента отражения.

Пример. Условия те же самые, что и в предыдущем примере, но, кроме того, задано $l = 15 \lambda_{\text{ср}}$ и $\frac{2\Delta f}{f_0} = 10\%$.

Находим параметр k по (3.74):

$$k = 2 \cdot 0,1 \cdot 15 = 3.$$

По кривой рис. 3.16, б при значении параметра $k=3$ находим $x = 2,7$ при $F(x) = 0,9$.

Из (3.73) находим

$$|\Gamma_{\Sigma}| < 2,7 \sqrt{5 \cdot 0,025^2} = 0,15,$$

т. е. КБВ $> 0,74$ (по графику на рис. 3.17, а).

Таким образом, можно утверждать с вероятностью 0,9 (т. е. у 90 экземпляров из 100), что минимальный КБВ на входе тракта в полосе частот 10% будет не хуже 0,74.

3.9. ВОЛНОВОДНЫЙ МНОГОПОЛЮСНИК

Под волноводным многополюсником понимается часть пространства, заключенная внутри проводящей поверхности, замкнутой всюду, за исключением нескольких отверстий, к каждому из которых подходит волноводная линия (рис. 3.18).

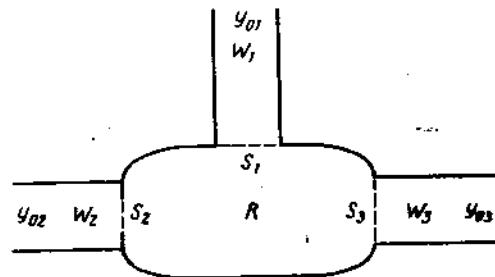


Рис. 3.18. Схема волноводного многополюсника.

В практике наиболее типичным является случай, когда в волноводах распространяется только по одной основной волне. Обозначим амплитуды электрических и магнитных волн, распространяющихся в волноводах, соответственно через U и I , причем каждая из них складывается из падающей и отраженной волн.

Выберем отсчетные плоскости на стыках волноводов с резонатором так, чтобы отверстия связи находились в поперечных сечениях волноводов, однако не обязательно совпадали с ними полностью (т. е. часть поперечного сечения волновода в отсчетной плоскости может быть металлизирована).

Если устройство не содержит нелинейных элементов, то между амплитудами существует зависимость [36]

$$\sum_{(p)} Y_{qp} U_p = I_q, \quad (3.76)$$

где q и p — номер отверстий связи резонатора с соответствующими волноводами.

Выражение (3.76) по форме совпадает с аналогичным выражением для квазистационарных схем. В соответствии с ним, используя метод узловых напряжений, для волноводного многополюсника можно построить схему замещения и производить с ней все формальные преобразования.

В рассматриваемом методе сам многополюсник характеризуется проводимостями Y_{qp} , а волноводы заменяются эквивалентными длинными линиями с постоянными распространения для распространяющихся ТЕ-волн $\gamma_{0q} = \sqrt{k^2 - k_{0q}^2}$ и характеристическими проводимостями для этих волн

$$Y_{0q} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\gamma_{0q}}{k} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\lambda}{\Lambda_q}. \quad (3.77)$$

Индекс «0» указывает на принадлежность к распространяющейся волне в q -м волноводе; Λ_q — длина волны, распространяющейся в волноводе. Проводимости Y_{qp} определяются местными полями волноводов на стыке с резонатором (Y_{qq}^W) и полями, существующими внутри резонатора (Y_{qp}^R):

$$Y_{qp} = Y_{pq} = Y_{qp}^W \delta_{qp} + Y_{qp}^R, \quad (3.78)$$

где

$$\delta_{qp} = \begin{cases} 1 & \text{при } q = p, \\ 0 & \text{при } q \neq p. \end{cases} \quad (3.79)$$

Мощность сторонних источников определяется обычной формулой

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2} \sum_{(q)} U_q I_q^*. \quad (3.80)$$

Индекс «*» означает комплексно-сопряженную величину. Проводимости могут быть рассчитаны, если заданы координатные функции $\tilde{\mathcal{E}}_q$ распределения касательного электрического поля на отверстиях связи. При практических расчетах обычно эти функции выбирают приближенно в виде «подходящих» функций, учитывающих лишь основные, заметные особенности аппроксимируемых полей. Их выбор в большинстве случаев не является критичным, поскольку проводимости Y_{qp} являются функционалами полей.

При известных координатных функциях проводимости определяются следующим образом.

Проводимость со стороны волновода равна

$$Y_{qq}^W = \frac{1}{n_{0q}^2} \sum_{(a)} Y_{aq} n_{aq}^2. \quad (3.81)$$

Здесь Y_{aq} — характеристические проводимости q -го волновода для ТЕ ($a \equiv h$)- и TM ($a \equiv e$)-полей (индекс « a » означает номер волны в волноводе), причем

$$Y_a = \begin{cases} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\gamma_h}{ik} & \text{для ТЕ-волн,} \\ \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{ik}{\gamma_e} & \text{для TM-волн,} \end{cases} \quad (3.82)$$

где $\gamma_{h,e} = \sqrt{x_{h,e}^2 - k^2}$ и $x_{h,e}$ — критические волновые числа.

Величина n_{aq} имеет смысл коэффициента трансформации идеального трансформатора:

$$n_{aq} = \int_S \bar{\mathcal{E}}_a \bar{\mathcal{H}}_q dS_q, \quad (3.83)$$

где $\bar{\mathcal{E}}_a$ — ортонормированные собственные векторные функции поперечного электрического поля в волноводе (табл. 3.16).

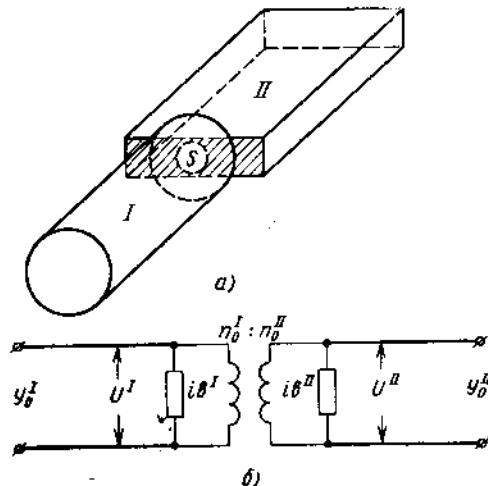


Рис. 3.19. Стык двух волноводов разного сечения (а) и его схема замещения (б).

Суммирование в (3.81) проводится по всем местным полям в волноводе.

Проводимость со стороны резонатора равна

$$Y_{qp}^R = \frac{1}{n_{0q} n_{0p}} \int_S \bar{\mathcal{H}}_q [\bar{n} \bar{H}^R \{\bar{\mathcal{E}}_p\}] dS_q, \quad (3.84)$$

здесь \bar{n} — внешняя нормаль к резонатору;

$H^R \{\bar{\mathcal{E}}_p\}$ — магнитное поле в резонаторе, возбужденное электрическим полем $\bar{\mathcal{E}}$ p -го отверстия, вычисленное при металлизации всех других отверстий связи.

Если металлические поверхности волноводов и резонатора будут идеально проводящими, то проводимости (3.81) и (3.84) есть чисто мнимые величины.

Частным случаем волноводного многополюсника (четырехполюсника) является плоскоперечный стык двух волноводов различного сечения (рис. 3.19, а). Если в волноводах распространяется только единственная волна, то схема замещения такого стыка имеет вид, показанный на рис. 3.19, б.

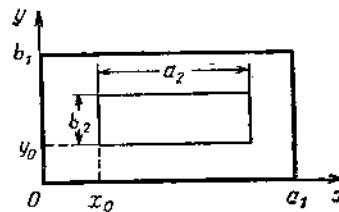


Рис. 3.20. Сечение скачка прямоугольного волновода.

Шунтирующие реактивности iB^I и iB^{II} определяются формулой (3.81):

$$\left. \begin{aligned} iB^I &= \frac{1}{(n_0^I)^2} \sum' (Y_a^I (n_a^I)^2), \\ iB^{II} &= \frac{1}{(n_0^{II})^2} \sum' (Y_a^{II} (n_a^{II})^2). \end{aligned} \right\} \quad (3.85)$$

Коэффициенты идеального трансформатора определяются формулой (3.83):

$$\left. \begin{aligned} n_0^I &= \int_S \bar{\mathcal{E}}_0^I \bar{\mathcal{H}} dS, \\ n_0^{II} &= \int_S \bar{\mathcal{E}}_0^{II} \bar{\mathcal{H}} dS. \end{aligned} \right\} \quad (3.86)$$

Для примера положим, что имеет место скачок сечения волновода (рис. 3.20).

Для расчета выберем координатную функцию, аппроксимирующую касательное электрическое поле на отверстии, в виде ортонормированной собственной векторной функции распространяющейся волны в волноводе II

$$\bar{\mathcal{E}} = \bar{\mathcal{E}}_0^{II} = \sqrt{\frac{2}{a_2 b_2}} \sin \frac{\pi(x - x_0)}{a_2} \bar{y}^0, \quad (3.87)$$

где \bar{y}^0 — орт по координате y .
Тогда имеем:

$$n_0^{II} = 1, \\ n_0^I = \sqrt{\frac{b_2}{b_1}} \frac{4 \sin \frac{\pi}{a_1} \left(x_0 + \frac{a_2}{2} \right) \cos \frac{\pi a_2}{2a_1}}{\pi \left(\frac{a_1}{a_2} - \frac{a_2}{a_1} \right)}. \quad (3.88)$$

Если окно связи симметрично относительно линии $x = \frac{a_1}{2}$ ($x_0 = \frac{a_1 - a_2}{2}$), то с достаточной точностью можно считать

$$n_0^I \approx \sqrt{\frac{b_2}{b_1}}. \quad (3.89)$$

Тогда условие согласования волноводов по вещественной части можно записать в виде

$$\frac{1}{b_1} Y_0^I = \frac{1}{b_2} Y_0^{II}. \quad (3.90)$$

Условием согласования по мнимой части является равенство нулю реактивных проводимостей

$$B^I = B^{II} = 0. \quad (3.91)$$

В случае резонансной диафрагмы эмпирическая формула для условия резонанса в стандартных волноводах имеет вид [37]

$$\frac{a_1}{b_1} Y_0^I = \frac{a_2}{b_2} Y_0^{II}. \quad (3.92)$$

Уравнение (3.76) волноводного многополюсника удобно записать в матричной форме

$$[Y] [U] = [I]. \quad (3.93)$$

Переход от матрицы проводимостей $[Y]$ к матрице рассеяния $[S]$ осуществляется с помощью преобразования

$$[S] = ([Y_0] + [Y])^{-1} ([Y_0] - [Y]), \quad (3.94)$$

где $[Y_0]$ — диагональная матрица, составленная из характеристических проводимостей волноводов для распространяющихся волн.

ЛИТЕРАТУРА

- Мегла Г. Техника дециметровых волн. Пер. под ред. Н. Г. Свистова. Изд-во «Советское радио», 1958.
- Ширман Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. Связьиздат, 1959.
- Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи. Изд-во «Советское радио», 1955.

- Барлоу Г. Допустимые рабочие мощности в волноводах. «Вопросы радиолокационной техники». Изд-во иностранной литературы, 1952, 5 (11).
- Линии передачи сантиметровых волн, ч. I. Под ред. Г. А. Ремеза. Изд-во «Советское радио», 1951.
- Андерсон Т. Прямоугольный волновод и волноводы типов П и Н. «Вопросы радиолокационной техники». Изд-во иностранной литературы, 1957, 6 (42).
- Харвей А. Стандартные волноводы и соединительные устройства для аппаратуры сантиметровых волн. «Вопросы радиолокационной техники». Изд-во иностранной литературы, 1956, 5 (35).
- Изюмова Т. И. и Свиридов В. Т. Полые и ленточные радиоволноводы. Госэнергоиздат, 1960.
- Дорожов А. П. Расчет и конструирование антенно-фильтрных устройств. Издание Харьковского университета им. А. М. Горького, 1960.
- Берграйт Г. В. Допуски и размеры прямоугольных полых волноводов. Technische Mitteilungen, 1956, № 9.
- Нагуев А. Ф. Microwave Engineering, London a. New York, 1963.
- Лебедев И. В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Госэнергоиздат, 1962.
- Рамо С. и Уинниер Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. ОГИЗ, 1948.
- Гольдштейн Л. Д. и Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. Изд-во «Советское радио», 1956.
- Янке Е. и Эмде Ф. Таблицы функций с формулами и кривыми. Гостехиздат, 1949.
- Волноводные линии передачи с малыми потерями. Пер. под ред. В. Б. Штейншлейтера. Изд-во иностранной литературы, 1960.
- Дерюгин Л. Н. Расчет критической частоты П и Н-волноводов. «Радиотехника», 1948, т. 3, № 6.
- Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. Изд-во «Советское радио», 1957.
- Гинзбург Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. Перевод с англ., под ред. Ремеза Г. А. Изд-во иностранной литературы, 1960.
- Муллен Д. А. и Притчард В. Л. Статистическое предсказание коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). Trans. IRE, MTT-5, № 2, April, 1957, p. 127—130.
- Справочник по волноводам. Пер. под ред. Я. Н. Фельда. Изд-во «Советское радио», 1952.
- Encyclopedic Dictionary of Electronics and Nuclear Engineering, R. Sarbacher, Prentice-Hall, N. Y., 1960, p. 532.
- Веденский Б. А. и Аренберг А. Г. Радиоволноводы, ч. I. Гостехиздат, 1946.
- Фельдштейн А. Л. Об энергетическом режиме высокочастотной линии передачи. «Радиотехника», 1949, т. 4, № 4.
- Бек А., Даусон Р. Измерение проводимости в сантиметровом диапазоне. «Вопросы радиолокационной техники», 1951, вып. 3.

26. Кухаркин Е. С., Сестрорецкий Б. В. Электрическая прочность волноводных устройств. Изд-во «Высшая школа», 1963.
27. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. Госэнергоиздат, 1963.
28. Ефимов И. Е. Радиочастотные линии передачи. Изд-во «Советское радио», 1964.
29. International Electrotechnical Commission. Hollow metallic waveguides. Part 2: Relevant specifications for ordinary rectangular waveguides. Publication 153-2 (First edition), 1964.
30. International Electrotechnical Commission. Hollow metallic waveguides. Part 3: Relevant specifications for flat rectangular waveguides. Publication 153-3 (First edition), 1964.
31. International Electrotechnical Commission. Hollow metallic waveguides. Part 4: Relevant specifications for circular waveguides. Publication 153-4 (First edition), 1964.
32. Anderson T. N., Kent L. I. Standardization of Ridged waveguides. The Microwave Journal, 1961, April, vol. 4, № 4.
33. Кисунько Г. В. Электродинамика полых систем. Изд. ВКАС, 1949.
34. Машковцев Б. М., Цибизов К. Н., Емелин Б. Ф. Теория волноводов. Изд-во «Наука», 1956.
35. Машковцев Б. М. Внешние параметры волноводного многополосника. Изд. ВКАС, 1957.
36. Коган Н. Л., Машковцев Б. М., Цибизов К. Н. Сложные волноводные системы. Судпромгиз, 1963.
37. Слэтер Дж. Электроника сверхвысоких частот. Пер. с англ., под ред. Гвоздовера С. Д. Изд-во «Советское радио», 1948.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРОСТЕЙШИЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЧ ТРАКТА

4.1. РАЗЪЕМЫ ПЕРЕДАЮЩИХ ЛИНИЙ

Высокочастотные разъемы характеризуются величинами: КВВ в диапазоне частот, номинального волнового сопротивления, допустимого рабочего напряжения, допустимой передаваемой мощности, вносимых потерь, электротехнической прочностью¹.

Соединения коаксиальных линий

В разъемах рекомендуется применять опорные шайбы из материала с малой диэлектрической проницаемостью. Высокая электрическая прочность разъема достигается путем подбора специальной конструкции опорной шайбы (рис. 4.1) [2].

Важными параметрами, характеризующими разъемы, являются предельная и допустимая мощности, которые можно передать через разъем. Предельной мощностью линии называют ту мощность, при которой наступает пробой. Допустимая мощность (см. § 3.3) для коаксиальной линии с диэлектрическими шайбами из полистирола меньше предельной в 20 раз.

Затухание разъема складывается из потерь, вносимых переходным сопротивлением контактов штырь — гнездо, контактов в корпусе разъема и потерь в диэлектрике.

Дросельное соединение коаксиальной линии [1, 2]. Отрезки коаксиальной линии иногда соединяются с помощью дроссельной (емкостной) связи (рис. 4.2). Разъем на рис. 4.2, а имеет меньшую полосу пропускания по сравнению с разъемом на рис. 4.2, б и не обеспечивает надлежащей электротехнической прочности.

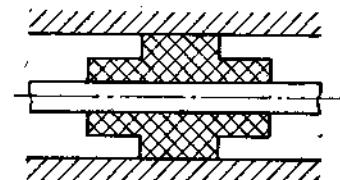


Рис. 4.1. Специальная опорная шайба.

¹ Электротехническая прочность — отношение мощности, проходящей по передающей линии, к мощности, излученной в пространство из разъема линии.

Дроссельное соединение на рис. 4.2, б состоит из двух коротко-замкнутых коаксиальных полуволновых линий ABC и DEG , включенных последовательно в основную линию передачи. В этих линиях образуется стоячая волна тока с узлами тока в точках B и E (см. эпюру тока на рис. 4.2) и пучностью тока в точках A и D . Механическое соединение двух отрезков линий происходит в точках B и E , т. е. там, где ток минимальен, а следовательно, качество контакта

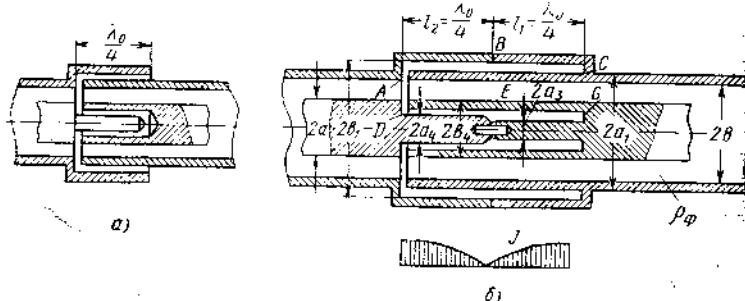


Рис. 4.2. Два вида соединений с дросельной связью.

в этом месте не играет существенной роли. Входное сопротивление боковых линий (точки A и D) равно нулю. Рассмотренный принцип работы соединения справедлив только для одной фиксированной длины волны. Для улучшения согласования участки AB и DE делаются с меньшим волновым сопротивлением, чем волновые сопротивления основной линии и участков BC и EG . Рекомендуется сдвигать зазоры во внутреннем и внешних проводниках (точки A и D) относительно друг друга на расстояние, равное четверти длины волны. При сдвиге уменьшается рассогласование (т. е. полоса пропускания разъема расширяется).

При применении дросельного соединения передаваемая по линии мощность снижается до величины

$$P_1 = P \left(\frac{a_4}{a} \right)^2, \quad (4.1)$$

где a_4 и a обозначены на рис. 4.2, б;

P — мощность в линии при отсутствии соединения.

Порядок расчета дросельного соединения приведен в [1, 2, 18].

Соединения волноводных линий

Для соединения отрезков волноводных линий передачи используют два основных типа фланцевых соединений: дросельное и контактное.

Конструктивное выполнение волноводных дросельных соединений не отличается принципиально от подобных соединений коаксиальных линий. Основное достоинство соединения — нечувствительность к небольшим перекосам. Механическое соединение двух секций волновода осуществляется в точке B (рис. 4.3), где находится узел тока. Электрический контакт осуществляется в точке A ,

так как длина короткозамкнутой линии ABC равна $\lambda/2$, входное сопротивление ее в точке A равно нулю, т. е. волноводы как бы идеально сопрягаются. В прямоугольных волноводах внешний круговой паз возбуждается колебаниями типа H_{11} ; конфигурация

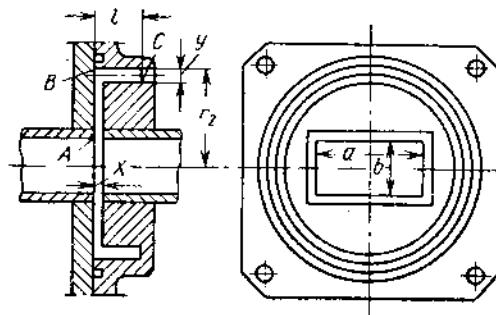


Рис. 4.3. Волноводное дросельное соединение.

силовых линий электрического поля в дросельном соединении показана на рис. 4.4.

Порядок расчета дросельно-фланцевого соединения дан в [1, 2, 18].

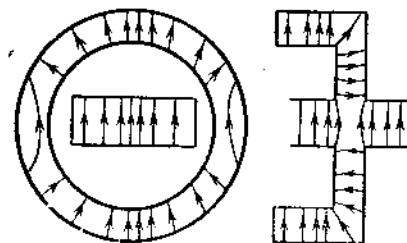


Рис. 4.4. Конфигурация силовых линий электрического поля в дросельном соединении.

Контактные соединения волноводов

Притертый фланец (рис. 4.5) при тщательной обработке и строгой параллельности фланцевых поверхностей имеет хороший электрический контакт.

К недостаткам контактного фланцевого соединения с притертными фланцами следует отнести низкую надежность при многократных переборках и трудность достижения необходимых допусков при массовом изготовлении, возрастающую с увеличением размеров волновода.

Фланцевые соединения с бронзовыми рассечеными прокладками. Во фланцевом соединении с плоской бронзовой прокладкой (рис. 4.6) электрический контакт осуществляется с помощью пружинящих лепестков, расположенных по внутреннему периметру поперечного сечения волновода. Прокладка фиксируется относительно

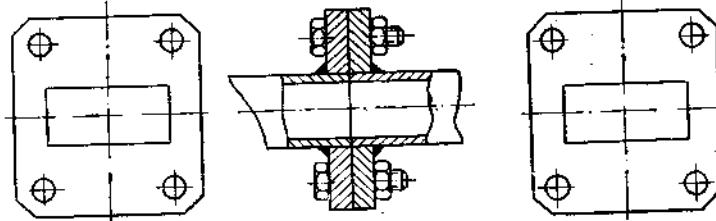


Рис. 4.5. Фланцевое соединение с притертыми фланцами.

канала волновода соединительными болтами и направляющими. Герметизация соединения осуществляется двумя резиновыми прокладками, расположенными по обе стороны от контактной прокладки.

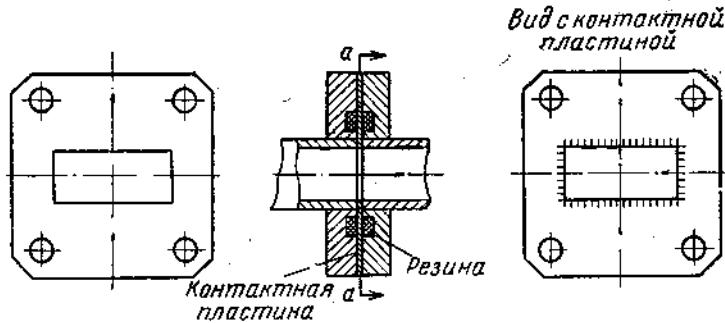


Рис. 4.6. Фланцевое соединение с бронзовой рассеченной прокладкой.

Фланцевое соединение с бронзовой контактной прокладкой «коробочкой» (рис. 4.7)¹. Электрический контакт, так же как описано выше, осуществляется при помощи пружинящих лепестков контактной прокладки. Герметизация достигается одной резиновой прокладкой. Конструкции контактных пластин показаны на рис. 4.8.

Прокладка на рис. 4.8, а имеет следующие недостатки: при жатии лепестки слипаются и не пружинят, в конце просечек зубья возникают трещины. Лепестки прокладки на рис. 4.8, б не оставляют рубцов на фланцах и хорошо пружинят, однако возможна возникновения трещин сохраняется.

¹ Авторами использованы некоторые результаты работы Б. В. Сестрорецкого.

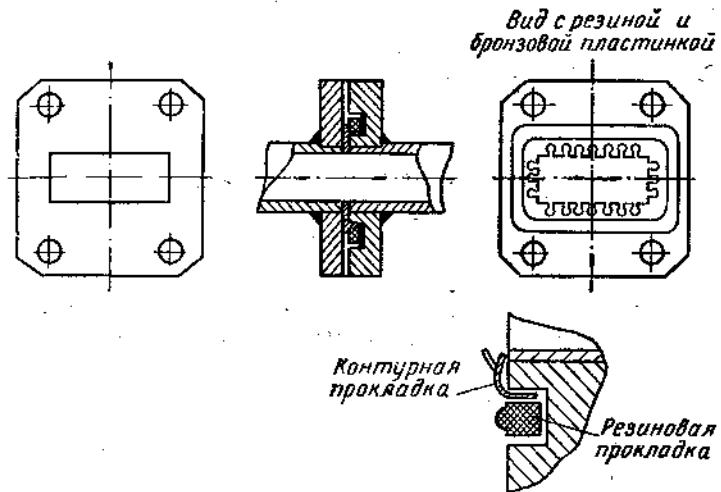


Рис. 4.7. Контактное фланцевое соединение с бронзовой рассеченной прокладкой «коробочкой» и одной резиновой прокладкой.

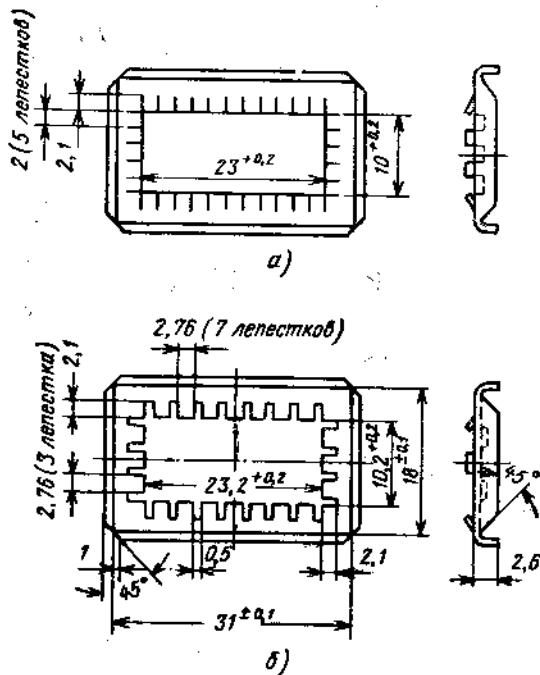


Рис. 4.8. Типы просечек контактных прокладок.

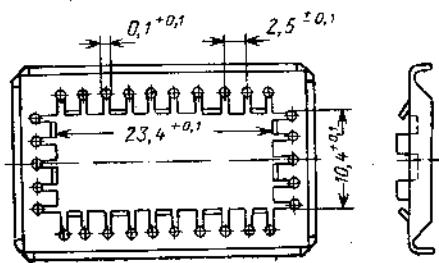


Рис. 4.9. Рабочая контактная прокладка.

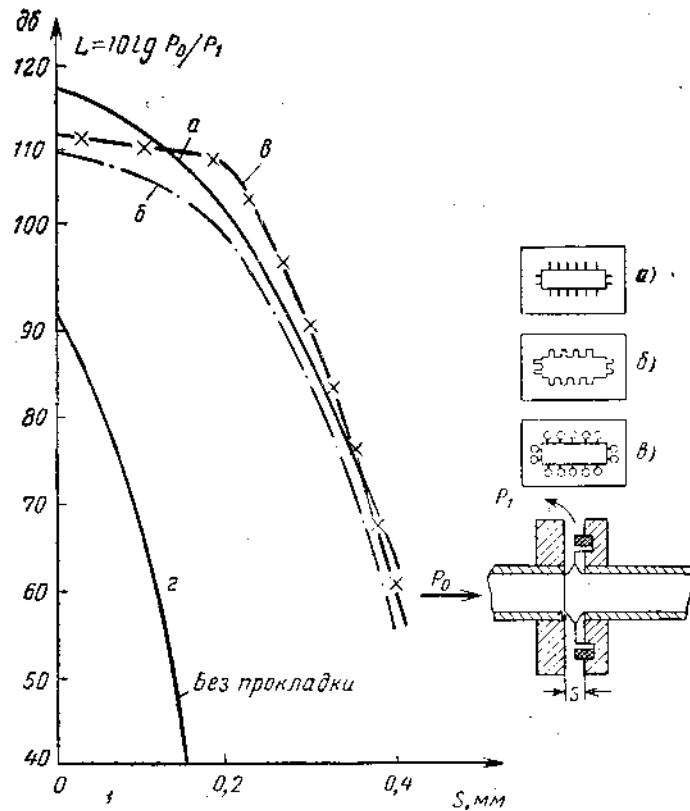


Рис. 4.10. Зависимость электротехническости от зазора между фланцами (толщина прокладки 0,1 мм).

Для ликвидации возможности появления трещин в конце пропечки лепестков делают отверстия, как показано на рис. 4.9. Наличие зазоров между зубьями несколько увеличивает потери и снижает уровень электротехническости.

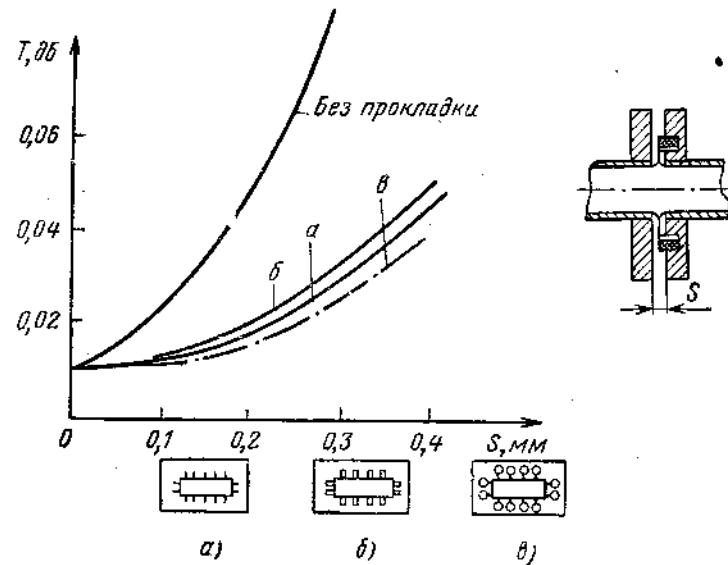


Рис. 4.11. Зависимость вносимых потерь от величины зазора между фланцами (толщина прокладки 0,1 мм).

Влияние зазора (s) между фланцами стандартного волновода 23×10 для прокладок видов a и b (рис. 4.8 и 4.9) на электротехническость L показано на рис. 4.10, а на величину вносимых потерь T — на рис. 4.11.

4.2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШАЙБЫ

Основное назначение диэлектрических шайб — крепление внутреннего проводника в центре коаксиальной линии. Шайбы вызывают изменения волнового сопротивления и постоянной распространения. Отражения от шайб уменьшаются при применении более тонких шайб. Для таких шайб коэффициент бегущей волны (КБВ) [3]

$$KBB = 1 - \frac{2\pi b}{\lambda_0} (\epsilon_r - 1) \quad (4.2)$$

при

$$\frac{b}{\lambda_0} \ll 1,$$

где b — толщина шайбы;
 λ_0 — средняя длина волны в рабочем диапазоне частот;
 ϵ_r — диэлектрическая проницаемость шайбы.

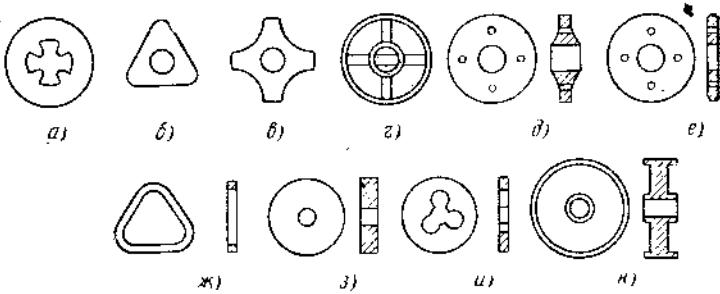


Рис. 4.12. Некоторые формы диэлектрических шайб в коаксиальной линии.

Форма диэлектрических шайб (рис. 4.12) выбирается такой, чтобы при минимальном количестве материала были достигнуты максимальная величина пробивного напряжения и необходимая центровка внутреннего проводника линии.

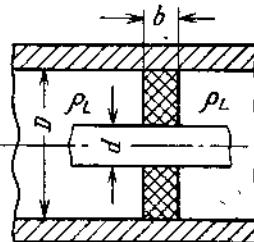


Рис. 4.13. Опорная шайба в коаксиальной линии.

Для компенсации параллельной емкости C_s (для согласования волнового сопротивления шайбы с волновым сопротивлением линии) на участке линии, занимаемом шайбой, изменяют диаметры проводников линии, как показано на рис. 4.15. Степень компенсации параллельной емкости слабо зависит от частоты до тех пор,

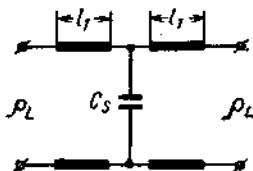


Рис. 4.14. Схема замещения шайбы отрезком линии и емкостью.

пока средняя длина волны рабочего диапазона частот λ_0 достаточно сильно отличается от величины πl [3], т. е.

$$\lambda_0 = (3 \div 4) \pi l, \quad (4.3)$$

где $2l_1$ — действующая длина шайбы.

При $\frac{b}{\lambda_0} < \frac{0,1}{V_{\epsilon_r}}$ можно считать, что $l = b$ (рис. 4.13), а в остальных случаях

$$l = \frac{b \ln \frac{S}{s}}{\ln \frac{D}{d}}. \quad (4.4)$$

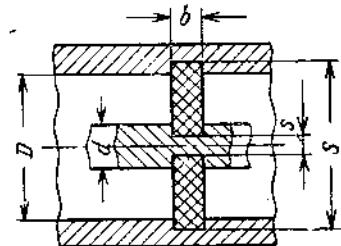


Рис. 4.15. Форма шайбы коаксиальной линии для компенсации изменения волнового сопротивления на участке шайбы.

Размеры «утопленных» шайб выбираются так, чтобы волновое сопротивление на участке шайбы было равно волновому сопротивлению линии. Например, для шайбы на рис. 4.15

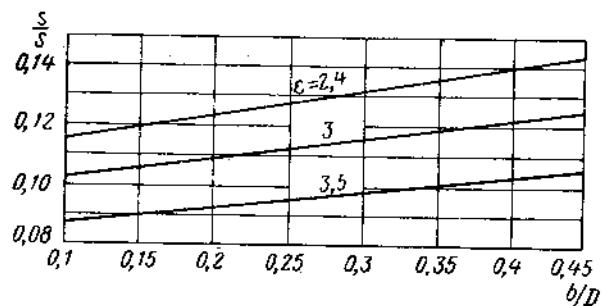


Рис. 4.16. График для определения основных размеров шайб с различными ϵ_r .

$$\rho = 60 \ln \frac{D}{d} = \frac{60}{V_{\epsilon_r}} \ln \frac{S}{s}. \quad (4.5)$$

Диаметры шайб для коаксиальной линии можно выбрать из графика на рис. 4.16 (обозначения указаны на рис. 4.15).

Для уменьшения отражений от шайбы (а также в случае, если размер s выбираем из конструктивных соображений больше расчетного) уменьшают действующее значение диэлектрической проницаемости шайбы путем удаления части диэлектрика (выточки на шайбе), как показано на рис. 4.17.

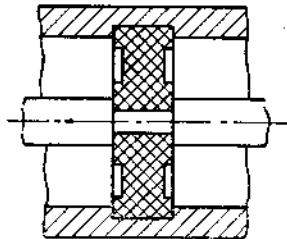


Рис. 4.17. Форма шайбы с выточкой.

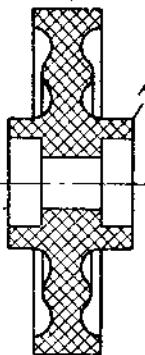


Рис. 4.18. Диэлектрическая шайба с повышенной электрической прочностью.

Диэлектрическая шайба с повышенной электрической прочностью на рис. 4.18 позволяет получить электрическую прочность коаксиальной линии того же порядка, что и при использовании коаксиальной линии с «металлическими изолаторами». Шайба, изготовленная из одного куска фторпласт-4, крепится на проводнике с помощью прессовой или плотной посадки. Основным элементом шайбы, препятствующим появлению поверхностного разряда, является «ступица» A (рис. 4.18).

4.3. ИЗГИБЫ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА

При выполнении волноводного тракта часто приходится изгибать волновод под различными углами. Резкие изгибы тракта соз-

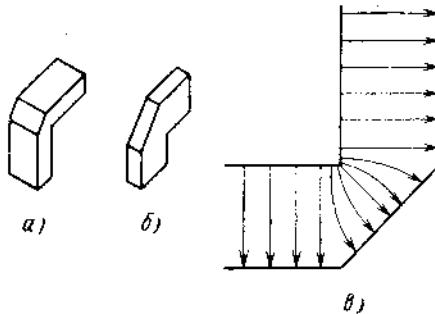


Рис. 4.19. Прямоугольные изгибы:
а—Е-уголок; б—Н-уголок;
в—распределение силовых линий электрического поля.

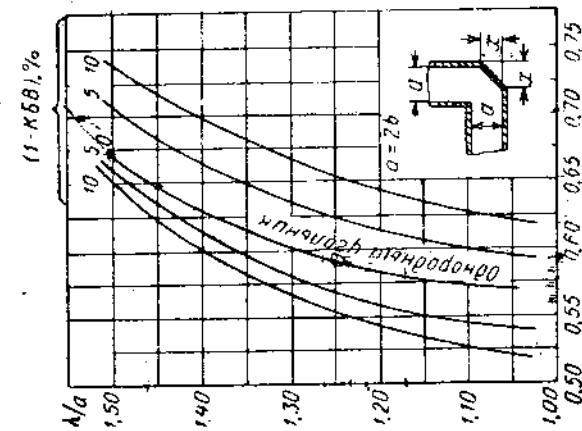


Рис. 4.21. График для определения оптимальных размеров Н-уголка.

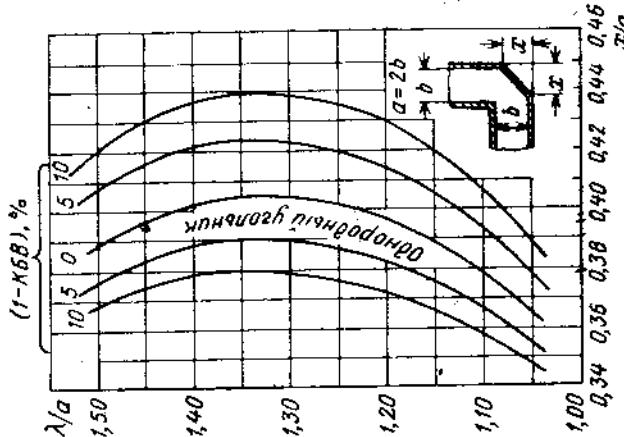


Рис. 4.20. График для определения оптимальных размеров Е-уголка.

дают отражения. Для уменьшения отражений изгибы делают на участках длиной в несколько длин волн. Волновод можно изгибать как по широкой стенке (изгиб в плоскости электрического поля, так называемый Е-изгиб), так и по узкой стенке (изгиб в плоскости магнитного поля, так называемый Н-изгиб).

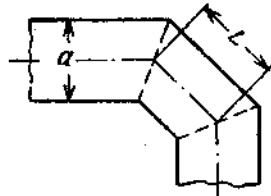


Рис. 4.22. Прямоугольный изгиб с двойным поворотом (Н-уголок).

Прямоугольные изгибы (так называемые одинарные уголковые изгибы) показаны на рис. 4.19, а и б. Примерная картина распределения силовых линий электрического поля в месте изгиба прямоугольного одинарного Е-уголкового изгиба показана на рис. 4.19, в.

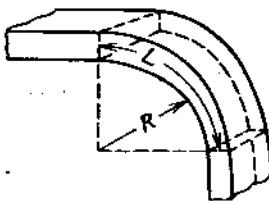


Рис. 4.24. Плавный изгиб прямоугольного волновода в плоскости Е.

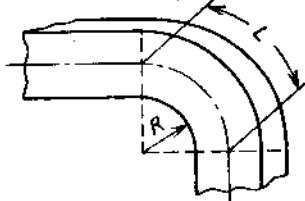


Рис. 4.25. Плавный изгиб прямоугольного волновода в плоскости Н.

Оптимальные размеры Е и Н одинарных уголковых изгибов для прямоугольного волновода могут быть определены по графикам на рис. 4.20 и 4.21. Более широкополосными являются уголки с двойным поворотом под 45° (рис. 4.22), расположенные на расстоянии L , примерно равном четверти длины волны в волноводе; в этом случае отражения, возникающие от одного поворота, будут компенсироваться отражениями от другого.

Для Е-уголка длина L берется равной четверти длины волны в волноводе; для Н-уголка длина L определяется по графику на рис. 4.23.

Плавные изгибы в волноводах в плоскости Е (рис. 4.24) и в плоскости Н (рис. 4.25) создают отражения у каждого конца изгиба.

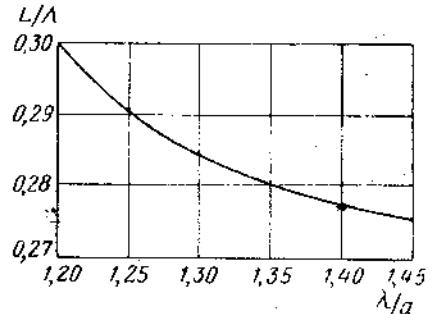


Рис. 4.23. График для определения оптимальных размеров двойного Н-уголка.

Для компенсации отражений от концов изгиба последний должен иметь среднюю длину L , примерно равную целому числу полуволни. Отражения сильно зависят от тщательности изготовления изгиба и деформации стенок при изгибе. При внутреннем радиусе изгиба R , большем, чем длина волны в волноводе, при хорошем качестве изготовления изгиба достигаются высокие значения КВВ.

4.4. ИЗГИБЫ КОАКСИАЛЬНОГО ТРАКТА

Изгибы коаксиальной линии выполняются под углом 90° в виде двух пересекающихся под прямым углом труб, спаянных по сгибу

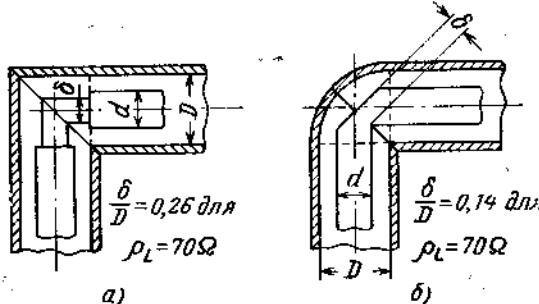


Рис. 4.26. Прямоугольные изгибы с коррекцией неоднородностей.

(рис. 4.26, а), либо в виде скругленных колен (рис. 4.27), внутри которых располагается центральный проводник линии.

Эквивалентная схема коаксиального уголка может быть представлена в виде отрезка линии длиной $2L$, в середине которого включена параллельная емкость (рис. 4.14).

Для лучшего согласования уменьшают емкость изгиба, что достигается изменением размеров центрального проводника линии, как показано на рис. 4.26. Иногда для уменьшения отражений при изгибе на 90° применяют два уголка по 45° каждый, расположенные на расстоянии в четверть длины волны.

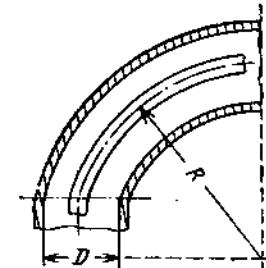


Рис. 4.27. Плавный изгиб коаксиальной линии.

4.5. ДИАФРАГМЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Тонкая металлическая пластинка, помещенная поперек волновода, называется диафрагмой. Толщина пластинки во много раз меньше длины волны в волноводе, но много больше глубины скин-

слоя. Диафрагмы используются в качестве неоднородностей для согласования сопротивлений или элементов резонансных систем и фильтров.

В непосредственной близости от диафрагмы в волноводе существуют поля высших типов волн, затухающие по мере удаления от

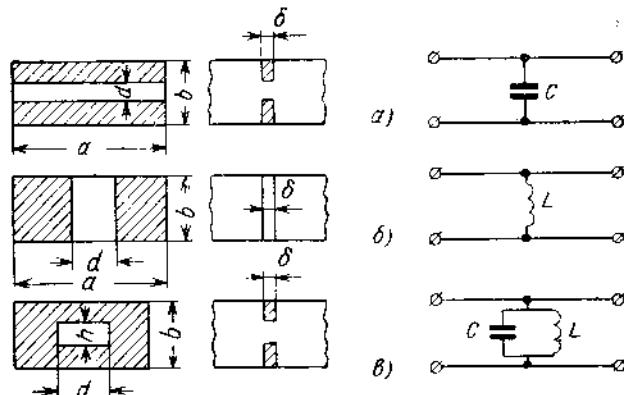


Рис. 4.28. Диафрагмы в волноводе и их эквивалентные схемы:

а — емкостная диафрагма; б — индуктивная диафрагма; в — резонансное окно.

неоднородности. Наиболее распространенными типами диафрагм являются емкостная, индуктивная и резонансная, показанные на рис. 4.28. Изменяя размеры диафрагмы, можно менять их эквивалентное сопротивление jB в широких пределах (рис. 4.29) [5, 6]. Точное значение параметров эквивалентных схем дано в [6].

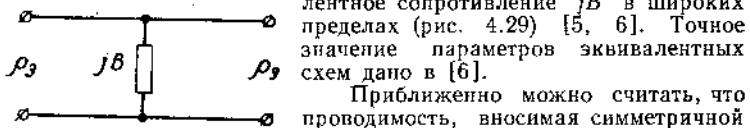


Рис. 4.29. Эквивалентная схема тонкой диафрагмы в волноводе.

$$B \approx -\frac{\lambda}{a} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d}{a}; \quad (4.6)$$

в случае односторонней (асимметричной) индуктивной диафрагмы

$$B \approx -\frac{\lambda}{a} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi d}{2a} \left(1 + \operatorname{cosec}^2 \frac{\pi d}{2a} \right). \quad (4.7)$$

В этих формулах не учтена толщина диафрагмы, а потому имеется некоторое расхождение с данными, полученными экспериментальным путем, что иллюстрируется рис. 4.30, где 1, 2 — экспериментальные данные; 3 — теоретическая кривая той же симметричной диафрагмы (при бесконечно тонкой диафрагме), а кривая 4 —

теоретическая кривая для несимметричной индуктивной диафрагмы; кружками отмечены экспериментальные данные.

Эквивалентная проводимость, вносимая симметричной емкостной диафрагмой (рис. 4.28, а), может быть определена по формуле

$$B \approx \frac{4b}{\Lambda} \ln \operatorname{cosec} \frac{\pi d}{2b}. \quad (4.8)$$

Эта формула также дает некоторое расхождение вычисленных значений с экспериментальными данными. Сопоставление теоретических значений проводимости симметричной диафрагмы с экспериментальными показано на рис. 4.31, где кривые 1 и 2 построены по экспериментальным данным при разной толщине диафрагмы; кри-

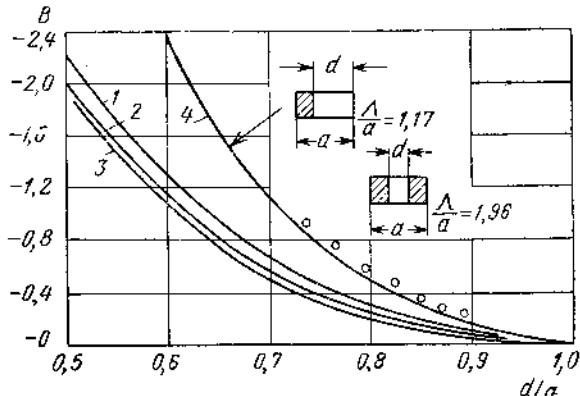


Рис. 4.30. Сопоставление теоретических значений проводимости индуктивной диафрагмы с экспериментальными.

вая 3 — теоретическая при бесконечно тонкой диафрагме; в случае емкостной диафрагмы ее толщина имеет существенное значение.

Для определения эквивалентной проводимости, вносимой симметричной индуктивной диафрагмой, в функции отношения λ/a при различных значениях d можно пользоваться графиком на рис. 4.32, справедливым для отношения $d/a = 0,023$. Влияние толщины симметричной диафрагмы на вносимую ею проводимость для любого значения узкой стороны волновода при $d/a = 0,66$ показано на рис. 4.33.

На графиках на рис. 4.34 дана зависимость эквивалентной проводимости, вносимой несимметричной индуктивной диафрагмой, от отношения λ/a при d/a как параметре при $d/a = 0,068$.

Влияние толщины несимметричной индуктивной диафрагмы на вносимую ею проводимость определяется кривыми на рис. 4.35, справедливыми для $d/a = 0,89$.

Для определения эквивалентной вносимой проводимости в случае симметричной емкостной диафрагмы, помещенной в прямоугольный волновод с отношением сторон $\frac{a}{b} = 2$ и толщиной, опре-

деляемой из соотношения $\delta = 0,023 a$, можно воспользоваться графиками на рис. 4.36.

Влияние толщины симметричной емкостной диафрагмы на вносимую ею проводимость определяется кривыми на рис. 4.37 для прямоугольного волновода с $a/b = 2$ и $\delta = 0,273 a$.

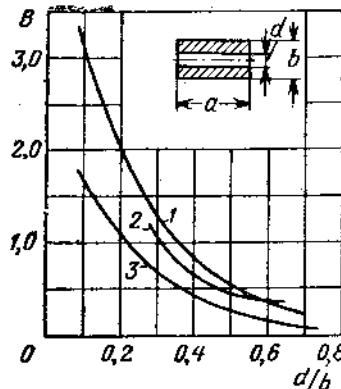


Рис. 4.31. Сопоставление теоретических значений проводимости емкостной диафрагмы с экспериментальными для $A/b = 4,4$.

$$\frac{A}{b} = 4,4.$$

зоваться формулой (3.92), из которой следует:

$$\sqrt{\frac{b}{a^2 - \frac{\lambda^2}{4}}} = \sqrt{\frac{b'}{a'^2 - \frac{\lambda^2}{4}}}; \quad (4.9)$$

отсюда также следует, что минимальный возможный размер a' , удовлетворяющий условию согласования, равен $\lambda/2$. При резонансе диафрагмы отражения отсутствуют при сколь угодно малом размере b' .

Другие возможные соотношения для сторон окна получаются также из уравнения (4.9). Обозначив текущие координаты геометрического места точек, на котором лежат вершины окна, удовлетворяющие условию согласования при фиксированной величине λ , через x и y (рис. 4.40), получим $a' = 2x$ и $b' = 2y$; тогда уравнение будет иметь вид

$$\frac{x^2}{\lambda^2} - \frac{y^2}{b^2 \lambda^2} = 1. \quad (4.10)$$

Выражение (4.10) является уравнением гиперболы в канонической форме. Соответствующее геометрическое построение сделано на

На рис. 4.38 приведены кривые, определяющие эквивалентную проводимость, вносимую несимметричной емкостной диафрагмой, установленной в прямоугольном волноводе с отношением сторон $a/b = 2$, при толщине диафрагмы, определяемой из выражения $\delta = 0,068 a$.

Влияние толщины несимметричной емкостной диафрагмы на вносимую ею проводимость показано на кривых рис. 4.39, справедливых при отношении $h/a = 0,386$.

Резонансная диафрагма. Эквивалентная схема резонансного окна (смешанная диафрагма, состоящая из комбинации емкостной и индуктивной диафрагм) представляет собой колебательный контур (рис. 4.28, б), шунтирующий волновод [5].

Для определения резонансных размеров диафрагмы $a' \times b'$ (рис. 4.40) можно воспользоваться формулой (3.92), из которой следует:

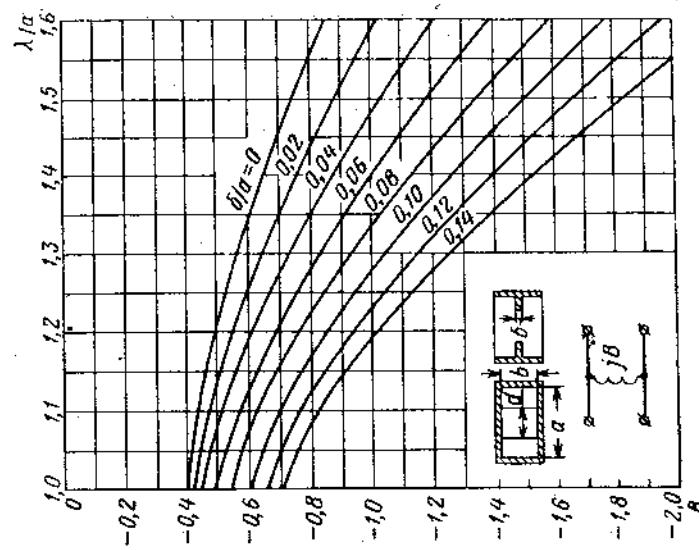


Рис. 4.33. Влияние толщины симметричной индуктивной диафрагмы на вносимую ею проводимость.

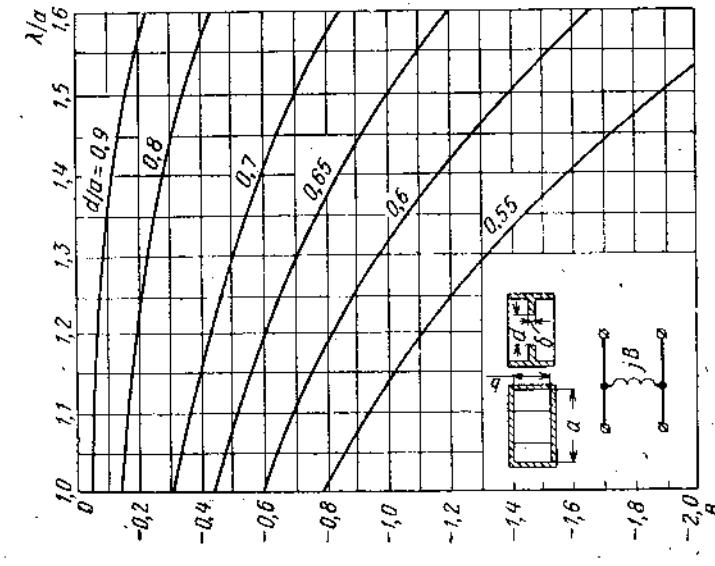


Рис. 4.32. Графики для определения проводимости, вносимой симметричной индуктивной диафрагмой.

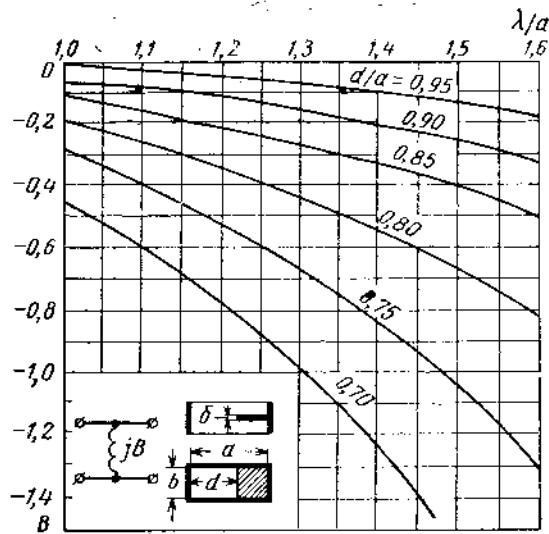


Рис. 4.34. Графики для определения проводимости, вносимой несимметричной индуктивной диафрагмой.

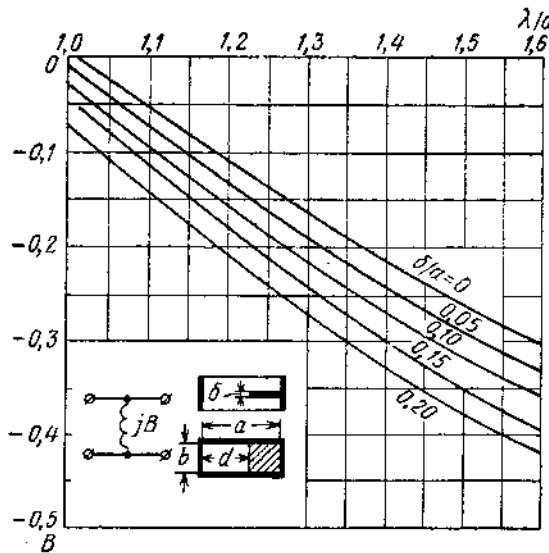


Рис. 4.35. Влияние толщины несимметричной индуктивной диафрагмы на вносимую ею проводимость.

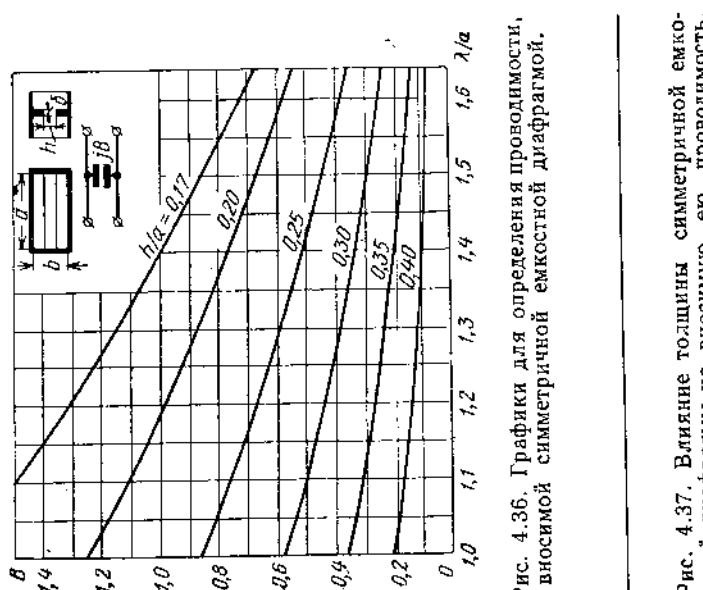
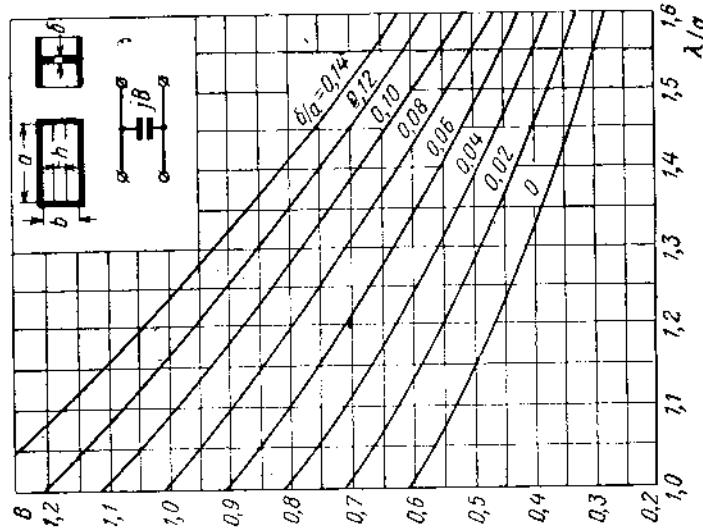


Рис. 4.36. Графики для определения проводимости, вносимой симметричной емкостной диафрагмой.

Рис. 4.37. Влияние толщины симметричной емкостной диафрагмы на вносимую ею проводимость.

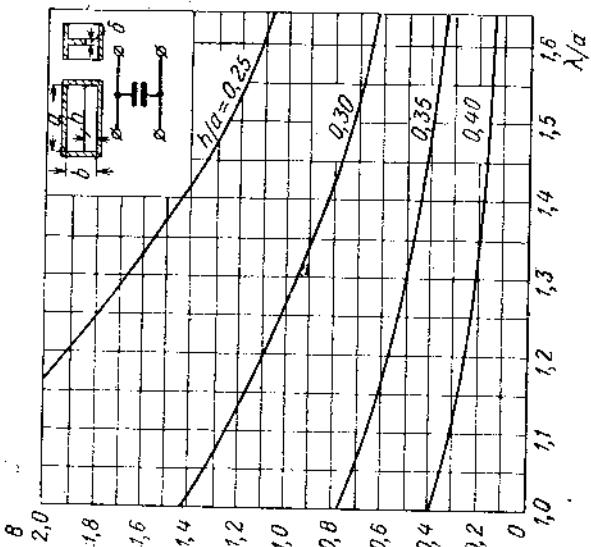


Рис. 4.38. Графики для определения проводимости, вносимой несимметричной емкостной диафрагмой.

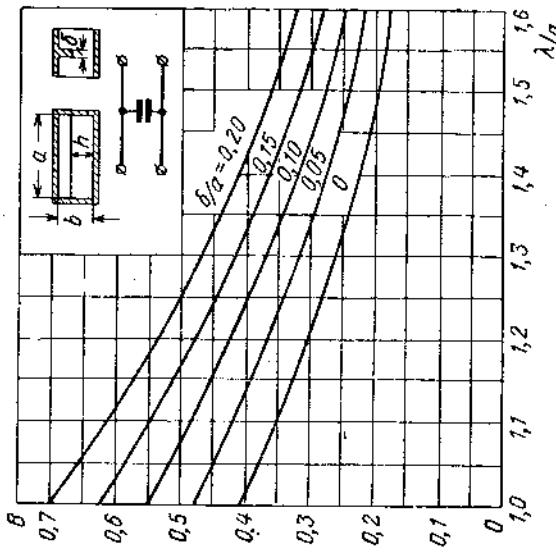


Рис. 4.39. Влияние толщины несимметричной ёмкостной диафрагмы на вносимую ею проводимость.

рис. 4.41. Очевидно, что окно обеспечивает полное согласование только на одной фиксированной волне. Если окно заполнено диэлектриком, то минимальный размер окна

$$\mu' \geq \frac{\lambda}{2V\varepsilon}. \quad (4.11)$$

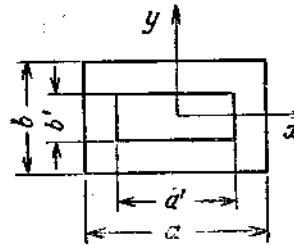


Рис. 4.40. Простейшее резонансное окно.

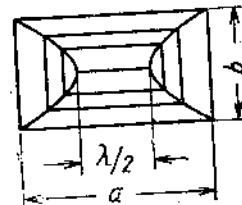


Рис. 4.41. Определение размеров резонансного окна, соответствующего отсутствию отражения на заданной волне.

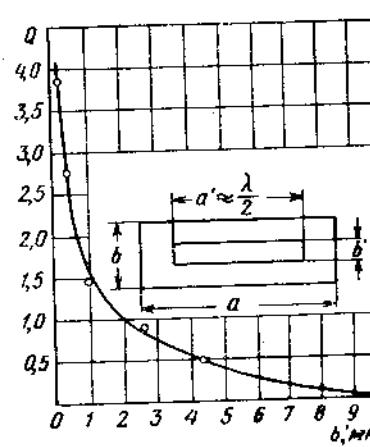


Рис. 4.42. Зависимость доб-ротности Q от высоты резонансного окна для прямоугольного волновода (72×10 мм).

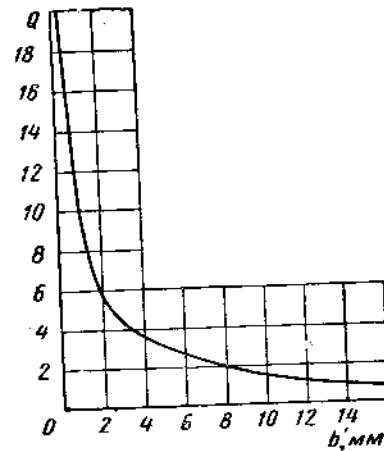


Рис. 4.43. Зависимость $Q = f(b')$ для прямоугольного волновода (72×10 мм).

Резонансные диафрагмы широко применяются в волноводных фильтрах. Основой расчета таких фильтров является расчет размеров отверстия диафрагмы $a' \times b'$ по заданных нагруженной добротности Q и резонансной волне λ_0 .

Зависимость добротности Q от высоты резонансного окна b' для волновода 72×10 дана на рис. 4.42 и для волновода 72×34 — на рис. 4.43.

Проводимость решетчатых диафрагм, образованных стержнями в волноводе [6, 15, 19].

1. Расчет проводимости решетчатых диафрагм, образованных стержнями, расположеннымными на разном расстоянии друг от друга и от стенок волновода, проводится по формулам работы [19].

Решетка из двух стержней $l = \frac{a}{3}$ (рис. 4.44);

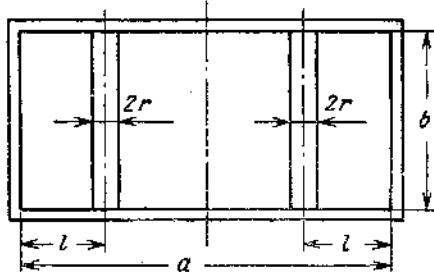


Рис. 4.44. Решетка из двух стержней в волноводе.

$$B_{(2)} = \frac{12A}{a \left\{ \ln \left[8 \left(\operatorname{sh} \frac{3\pi r}{a} \right) \left(\sin \frac{3\pi r}{a} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{6\pi r}{a\sqrt{2}} - \cos \frac{6\pi r}{a\sqrt{2}} \right) \right] - \right.} \\ \left. - 22,8 \frac{r}{a} - \frac{1 + 2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2}{9} \right\} \quad (4.12)$$

Приближенное значение:

$$B_{(2)} \approx \frac{12A}{a \left[11,63 - 9,2 \lg \frac{a}{r} - 22,8 \frac{r}{a} - 0,22 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right]} \quad (4.13)$$

где A — длина волны в волноводе;

λ — длина волны, на которую настраивают резонатор;

a — ширина волновода;

r — радиус стержня; $d = 2r$;

l — расстояние от стекки волновода до стержня.

¹ При пользовании таблицами необходимо учитывать, что при $Q_n < 150$ погрешность расчета добротности не превышает 2%, а при $Q_n = 200$ эта погрешность превышает 10%.

Таблица 4.1

Проводимость решетчатой диафрагмы из двух стержней $l = \frac{a}{3}$

$\frac{\lambda}{a}$	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65
0,0,0	0,499	1,604	1,714	1,822	1,938	2,044	2,242	2,414	2,584	2,785	3,014	3,279	3,532
0,0,12	1,615	1,727	1,847	1,974	2,110	2,256	2,416	2,591	2,785	3,002	3,249	3,535	3,872
0,0,14	1,727	1,846	1,975	2,111	2,257	2,414	2,585	2,772	2,980	3,212	3,477	3,783	4,144
0,0,16	1,836	1,965	2,101	2,246	2,401	2,568	2,750	2,950	3,171	3,419	3,701	4,026	4,411
0,0,18	1,944	2,081	2,225	2,379	2,544	2,721	2,914	3,126	3,360	3,623	3,922	4,267	4,675
0,0,20	2,052	2,196	2,348	2,511	2,685	2,873	3,077	3,301	3,548	3,826	4,142	4,507	4,938
0,0,22	2,159	2,311	2,472	2,643	2,827	3,025	3,240	3,475	3,736	4,029	4,362	4,746	5,200
0,0,24	2,266	2,426	2,596	2,776	2,969	3,177	3,403	3,651	3,925	4,233	4,582	4,987	5,464
0,0,26	2,375	2,542	2,720	2,909	3,112	3,330	3,567	3,828	4,116	4,438	4,805	5,229	5,730
0,0,28	2,484	2,660	2,846	3,044	3,256	3,485	3,733	4,006	4,308	4,646	5,030	5,474	5,998
0,0,30	2,594	2,778	2,973	3,180	3,402	3,641	3,901	4,186	4,502	4,855	5,257	5,722	6,270
0,0,32	2,705	2,898	3,101	3,318	3,550	3,800	4,072	4,369	4,699	5,068	5,488	5,973	6,546
0,0,34	2,818	3,018	3,232	3,458	3,700	3,961	4,244	4,555	4,899	5,284	5,722	6,228	6,826
0,0,36	2,933	3,143	3,365	3,600	3,853	4,125	4,420	4,744	5,103	5,504	5,961	6,488	7,111
0,0,38	3,050	3,269	3,500	3,745	4,008	4,292	4,600	4,937	5,310	5,729	6,204	6,753	7,402
0,0,40	3,170	3,397	3,637	3,893	4,167	4,462	4,782	5,133	5,522	5,957	6,452	7,024	7,698
0,0,42	3,291	3,528	3,778	4,044	4,329	4,636	4,969	5,334	5,738	6,191	6,705	7,309	8,002
0,0,44	3,415	3,661	3,921	4,198	4,494	4,813	5,160	5,539	6,959	6,430	6,964	7,582	8,312
0,0,46	3,542	3,797	4,068	4,355	4,663	4,994	5,354	5,749	6,185	6,674	7,230	7,871	8,629
0,0,48	3,671	3,937	4,218	4,516	4,836	5,180	5,554	5,964	6,417	6,925	7,501	8,168	8,954
0,0,50	3,804	4,079	4,371	4,681	5,013	5,371	5,759	6,184	6,654	7,181	7,780	8,471	9,288
0,0,52	3,939	4,226	4,528	4,850	5,195	5,566	5,969	6,410	6,898	7,445	8,066	8,783	9,630

$\frac{\lambda}{a}$	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65
0,054	4,690	4,690	4,856	5,020	5,573	5,766	6,184	6,642	7,148	7,715	8,359	9,103	9,982
0,056	4,221	4,529	4,856	5,026	5,573	5,972	6,406	6,880	7,405	7,993	8,661	9,432	10,343
0,058	4,367	4,687	4,856	5,026	5,573	5,770	6,184	6,633	7,125	7,670	8,279	8,971	10,771
0,060	4,518	4,850	5,020	5,573	5,972	6,401	6,867	7,377	7,942	8,573	9,291	10,120	11,998
0,062	4,672	5,016	5,380	5,676	6,180	6,625	7,108	7,637	8,222	8,876	9,620	10,479	11,492
0,064	4,831	5,188	5,565	5,966	6,394	6,856	7,356	7,904	8,510	9,189	9,959	10,849	11,899
0,066	4,994	5,365	5,756	6,171	6,615	7,093	7,612	8,180	8,808	9,511	10,309	11,23	12,318
0,068	5,163	5,546	5,952	6,382	6,843	7,338	7,876	8,464	9,115	9,843	10,670	11,625	12,752
0,070	5,396	5,734	6,154	6,600	7,077	7,591	8,148	8,758	9,432	10,186	11,043	12,032	13,199
0,072	5,515	5,927	6,363	6,825	7,320	7,852	8,429	9,061	9,759	10,541	11,428	12,453	13,662
0,074	5,699	6,127	6,578	7,058	7,570	8,122	8,720	9,374	10,098	10,908	11,827	12,888	14,140
0,076	5,889	6,332	6,800	7,298	7,829	8,400	9,020	9,698	10,448	11,287	12,239	13,339	14,636
0,078	6,086	6,545	7,030	7,546	8,096	8,689	9,331	10,034	10,811	11,680	12,666	13,805	15,149
0,080	6,288	6,765	7,268	7,802	8,373	8,987	9,653	10,381	11,186	12,087	13,109	14,289	15,681
0,082	6,498	6,992	7,514	8,068	8,660	9,296	9,986	10,742	11,576	12,509	13,588	14,791	16,233
0,084	6,715	7,228	7,769	8,343	8,957	9,617	10,332	11,111	11,980	12,947	14,045	15,312	16,806
0,086	6,940	7,471	8,033	8,628	9,265	9,949	10,691	11,503	12,399	13,402	14,540	15,853	17,401
0,088	7,172	7,724	8,306	8,924	9,584	10,294	11,064	11,905	12,835	13,675	15,054	16,415	18,020
0,090	7,413	7,986	8,590	9,231	9,916	10,653	11,451	12,324	13,288	14,266	15,589	17,000	18,664
0,092	7,663	8,257	8,885	9,550	10,261	11,025	11,853	12,759	13,759	14,977	16,146	17,609	19,354
0,094	7,922	8,539	9,191	9,882	10,620	11,418	12,272	13,212	14,250	15,410	16,726	18,244	20,034
0,096	8,191	8,832	9,509	9,927	10,993	11,816	12,708	13,684	14,761	15,965	17,331	18,906	20,763
0,098	8,471	9,137	9,840	10,586	11,381	12,237	13,163	14,176	15,294	16,544	17,962	19,597	21,525
0,100	8,762	9,454	10,185	10,960	11,786	12,675	13,638	14,690	15,851	17,149	18,621	20,342	22,320

Результаты расчета проводимости $B_{(2)}$ для двух стержней по формуле (4.12) приведены в табл. 4.1 для значений

$$\frac{\lambda}{a} = 1,05 \div 1,65 \quad \text{и} \quad \frac{d}{a} = 0,01 \div 0,10.$$

Решетка из трех стержней $l = \frac{a}{4}$ (рис. 4.45):

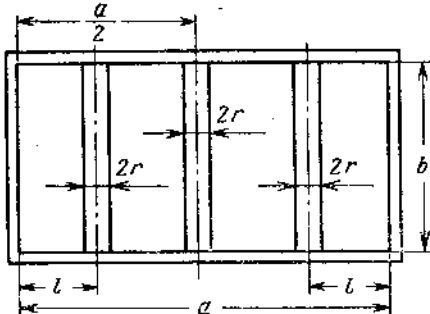


Рис. 4.45. Решетка из трех стержней в волноводе.

$$B_{(3)} = \frac{16\Lambda}{a \left\{ \ln \left[8 \left(\operatorname{sh} \frac{4\pi r}{a} \right) \left(\sin \frac{4\pi r}{a} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{8\pi r}{a\sqrt{2}} - \cos \frac{8\pi r}{a\sqrt{2}} \right) \right] - \right.} \rightarrow \left. - 30,3 \frac{r}{a} - \frac{1 + 2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2}{16} \right\}. \quad (4.14)$$

Приближенное значение:

$$B_{(3)} \approx \frac{16\Lambda}{a \left[12,83 - 9,2 \lg \frac{a}{r} - 30,3 \frac{r}{a} - 0,125 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right]}. \quad (4.15)$$

Результаты расчета по формуле (4.14) сведены в табл. 4.2 для значений

$$\frac{\lambda}{a} = 1,05 \div 1,65 \quad \text{и} \quad \frac{d}{a} = 0,01 \div 0,06.$$

Решетка из четырех стержней $\frac{l_1}{a} = 0,2$; $\frac{l_2}{a} = 0,4$ (рис. 4.46)

Таблица 4.2

Проводимость решетчатой диафрагмы из трех стержней $t = \frac{a}{4}$

$\frac{d}{a}$	$\frac{\lambda}{a}$													
0,010	2,289	2,446	2,614	2,792	2,982	3,188	3,142	3,658	3,930	4,236	4,583	4,985	5,460	5,460
0,012	2,491	2,662	2,844	3,038	3,246	3,471	3,715	3,983	4,280	4,612	4,984	5,428	5,455	5,455
0,014	2,690	2,876	3,072	3,257	3,507	4,04	4,312	4,623	4,924	5,303	5,794	5,866	6,425	6,425
0,016	2,888	3,088	3,300	3,525	3,767	4,028	4,312	4,623	4,924	5,303	5,794	5,866	6,425	6,425
0,018	3,087	3,301	3,516	3,769	4,028	4,307	4,611	4,944	5,313	5,662	6,103	6,605	7,197	7,384
0,020	3,288	3,492	3,736	3,992	4,266	4,560	4,877	5,221	5,599	6,017	6,486	7,019	7,636	8,365
0,022	3,492	3,700	3,958	4,281	4,823	5,113	5,469	5,856	6,280	6,726	7,176	7,636	8,370	8,870
0,024	3,697	3,913	4,186	4,475	4,783	5,113	5,469	5,856	6,280	6,726	7,176	7,636	8,370	8,870
0,026	3,897	4,131	4,420	4,725	5,051	5,400	5,776	6,185	6,533	7,130	7,687	8,230	9,177	9,177
0,028	4,097	4,355	4,660	4,924	5,326	5,694	6,092	6,593	6,997	7,521	8,109	8,777	9,549	10,462
0,030	4,297	4,586	4,907	5,242	5,610	6,072	6,474	6,872	7,371	7,924	8,544	9,248	10,063	11,025
0,032	4,497	4,823	5,162	5,903	6,312	6,753	7,233	7,759	8,341	8,993	9,635	10,593	11,606	11,606
0,034	5,069	5,426	5,803	6,205	6,636	7,160	7,605	8,157	8,771	9,458	10,239	11,141	12,208	12,208
0,036	5,323	5,698	6,096	6,519	6,972	7,460	7,991	8,573	9,218	9,940	10,761	11,710	12,831	12,831
0,038	5,587	5,981	6,399	6,844	7,320	7,834	8,392	9,004	9,681	10,440	11,303	12,300	13,479	13,479
0,040	6,860	6,275	6,714	7,182	7,682	8,222	8,808	9,511	10,162	10,960	11,866	12,914	14,152	14,152
0,042	6,144	6,440	6,580	7,042	7,533	8,059	8,626	9,241	9,916	10,664	11,501	12,553	13,553	13,553
0,044	6,446	6,748	6,988	7,383	7,898	8,451	8,946	9,693	10,402	11,186	12,065	13,703	14,915	16,347
0,046	7,069	7,476	7,729	7,738	8,280	8,360	9,486	10,164	11,371	12,270	13,157	14,370	15,642	17,144
0,048	7,405	7,936	8,497	9,094	9,733	10,422	11,170	11,990	12,897	13,914	15,069	16,403	17,980	17,980
0,050	7,756	8,313	8,903	9,630	10,201	11,024	11,709	12,570	13,522	14,589	15,801	17,201	18,866	19,775
0,052	8,124	8,709	9,328	9,986	10,691	11,502	12,275	13,178	14,178	15,297	16,569	18,039	19,775	19,775
0,054	8,509	9,124	9,744	10,466	11,206	12,003	12,869	13,877	14,866	16,042	17,376	18,919	20,741	20,741
0,056	9,500	8,914	10,243	10,970	11,747	12,584	13,493	14,489	15,391	16,825	18,226	19,846	21,758	21,758

Таблица 4.3

Проводимость решетчатой диафрагмы из четырех стержней $t = \frac{a}{2}$ и $t = \frac{a}{4}$

$\frac{d}{a}$	$\frac{\lambda}{a}$													
0,010	3,421	3,654	3,902	4,167	4,454	4,766	5,109	5,488	5,914	6,398	6,958	7,620	7,620	7,620
0,012	3,759	4,014	4,287	4,579	4,895	5,298	5,615	6,032	6,500	7,032	7,648	8,376	8,376	8,376
0,014	4,097	4,376	4,674	4,992	5,337	5,711	6,122	6,577	7,088	7,668	8,340	9,134	9,134	9,134
0,016	4,440	4,742	5,065	5,411	5,785	6,191	6,636	7,130	7,684	8,313	9,042	9,903	9,903	9,903
0,018	4,789	5,116	5,465	5,838	6,242	6,680	7,162	7,695	8,292	8,972	9,759	10,688	10,688	10,688
0,020	4,816	5,148	5,500	5,875	6,278	6,711	7,183	7,701	8,275	8,918	9,649	10,495	11,195	11,195
0,022	5,162	5,519	5,896	6,299	6,730	7,196	7,702	8,258	8,873	9,563	10,348	11,256	12,328	12,328
0,024	5,520	5,902	6,307	6,738	7,200	7,698	8,240	8,835	9,494	10,232	11,072	12,044	13,192	13,192
0,026	5,893	6,301	6,733	7,194	7,688	8,220	8,800	9,435	10,139	10,928	11,826	12,864	14,091	14,091
0,028	6,280	6,716	7,178	7,669	8,196	8,765	9,383	10,061	10,811	11,654	12,612	13,720	15,028	15,028
0,030	6,686	7,150	7,642	8,165	8,728	9,334	9,993	10,716	11,516	12,414	13,434	14,615	16,009	16,009
0,032	7,110	7,605	8,129	8,687	9,285	9,931	10,633	11,402	12,255	13,210	14,297	15,553	17,038	17,038
0,034	7,555	8,082	8,640	9,234	9,871	10,558	11,305	12,124	13,031	14,047	15,203	16,540	18,120	18,120
0,036	8,024	8,584	9,178	9,810	10,488	11,218	12,012	12,883	13,848	14,929	16,158	17,580	19,260	19,260
0,038	8,518	9,114	9,746	10,418	11,138	11,915	12,760	13,685	14,711	15,860	17,167	18,678	20,464	20,464
0,040	9,674	10,346	11,060	11,826	12,652	13,550	14,534	15,624	16,846	18,235	19,841	21,738	23,090	23,090
0,042	9,393	10,267	10,981	11,741	12,555	13,433	14,388	15,434	16,532	17,891	20,367	21,074	24,527	24,527
0,044	10,179	11,083	11,656	12,464	13,330	14,203	15,176	16,390	17,621	19,002	20,570	22,384	23,780	23,780
0,046	10,803	11,566	12,373	13,233	14,154	15,147	16,225	17,408	18,172	20,185	21,852	22,257	26,058	26,058
0,048	11,467	12,279	13,139	14,053	15,033	16,089	17,237	18,494	19,887	21,448	22,221	25,272	27,694	27,694
0,050	12,177	13,041	13,957	14,930	15,973	17,097	18,319	19,657	21,139	22,800	24,686	26,868	29,445	29,445

$$B_{(4)} = \frac{20\Lambda}{a \left\{ \ln \left[8 \left(\sin \frac{5\pi r}{a} \right) \left(\sin \frac{5\pi r}{a} \right) \left(\cosh \frac{10\pi r}{a\sqrt{2}} - \cos \frac{10\pi r}{a\sqrt{2}} \right) \right] + \right.} \\ \left. - 37,9 \frac{r}{a} - \frac{1 + 2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2}{25} \right\} \quad (4.16)$$

Приближенное значение:

$$B_{(4)} \approx \frac{20\Lambda}{a \left[13,75 - 9,2 \lg \frac{a}{r} - 37,9 \frac{r}{a} - 0,08 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right]} \quad (4.17)$$

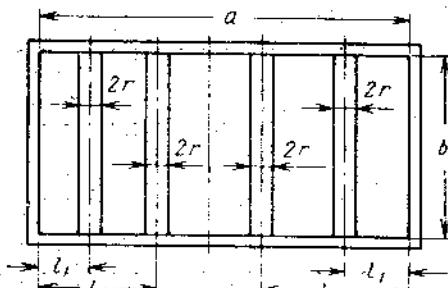


Рис. 4.46. Решетка из четырех стержней в волноводе.

Результаты расчета по формуле (4.16) сведены в табл. 4.3 для $\frac{\lambda}{a} = 1,05 \div 1,65$ и $\frac{d}{a} = 0,01 \div 0,05$.

Решетка из n стержней:

$$B_{(n)} = \frac{4(n+1)\Lambda}{a \left\{ \ln \left[8 \sin \frac{(n+1)\pi r}{a} \sin \frac{(n+1)\pi r}{a} \left(\cosh \frac{2(n+1)\pi r}{a\sqrt{2}} - \right. \right. \right.} \\ \left. \left. \left. - \cos \frac{2(n+1)\pi r}{a\sqrt{2}} \right) \right] - 7,6(n+1) \frac{r}{a} - \frac{1 + 2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2}{(n+1)^2} \right\}} \quad (4.18)$$

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, приведенных в работе [19], показывает, что формулы (4.12), (4.14) и (4.16) обеспечивают хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными (см. сноску на стр. 192).

2. Расчет проводимости решетчатых диафрагм, образованных стержнями, расположеннымими симметрично относительно середин-

волновода, но не на равных расстояниях друг от друга, проводится по приведенным ниже формулам для случая, когда $\frac{d}{a} \ll 1$ ($\frac{d}{a} \leq 0,05$).

Решетка из двух стержней: (рис. 4.44)

$$B_{(2)} = \frac{\Lambda}{a \left\{ 1 - \frac{\pi r}{4a} (1 + \sqrt{2}) - \frac{\ln \left(\frac{2a}{\pi r} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{a} \right)}{4 \sin^2 \frac{\pi l}{a}} - \frac{2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \frac{\sin^2 \frac{3\pi l}{a}}{\sin^2 \frac{\pi l}{a}} \right\}} \quad (4.19)$$

Решетка из трех стержней; рис. (4.45)

$$B_{(3)} = \frac{\Lambda}{a} \times \\ \times \left\{ \frac{2A_3 \sin^2 \frac{\pi l}{a} - 4A_2 \sin \frac{\pi l}{a} + A_1 - k \left(\sin \frac{\pi l}{a} + \sin \frac{3\pi l}{a} \right)^2}{\left(A_1 - k \sin^2 \frac{3\pi l}{a} \right) \left(A_3 - \frac{1}{2}k \right) - 2 \left(A_2 + \frac{1}{2}k \sin \frac{3\pi l}{a} \right)^2} \right\}, \quad (4.20)$$

где

$$A_1 = \left[2 - \frac{\pi r}{2a} (1 + \sqrt{2}) \right] \sin^2 \frac{\pi l}{a} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2a}{\pi r} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{a} \right); \quad (4.21)$$

$$A_2 = \left[1 - \frac{\pi r}{4a} (1 + \sqrt{2}) \right] \sin \frac{\pi l}{a} - \frac{1}{2} \ln \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi l}{2a} \right) \right]; \quad (4.22)$$

$$A_3 = 1 - \frac{\pi r}{4a} (1 + \sqrt{2}) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2a}{\pi r} \right); \quad (4.23)$$

$$k = 0,148 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2. \quad (4.24)$$

Решетка из четырех стержней при изменении $\frac{l_1}{a}$ и $\frac{l_2}{a}$: (рис. 4.46)

$$B_{(4)} = \frac{2\Lambda}{a} \left\{ \frac{C_1 \sin^2 \frac{\pi l_2}{a} - 2C_2 \sin \frac{\pi l_1}{a} \sin \frac{\pi l_2}{a} + C_3 \sin^2 \frac{\pi l_1}{a} -}{\left(C_1 - k \sin^2 \frac{3\pi l_1}{a} \right) \left(C_3 - k \sin^2 \frac{3\pi l_2}{a} \right) -} \right. \\ \left. - k \left(\sin \frac{3\pi l_1}{a} \sin \frac{\pi l_2}{a} - \sin \frac{3\pi l_2}{a} \sin \frac{\pi l_1}{a} \right)^2 \right\}, \quad (4.25)$$

где

$$C_1 = \left[2 - \frac{\pi r}{2a} (1 + \sqrt{2}) \right] \sin^2 \frac{\pi l_1}{a} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2a}{\pi r} \operatorname{tg} \frac{\pi l_1}{a} \right); \quad (4.26)$$

$$C_2 = \left[2 - \frac{\pi r}{2a} (1 + \sqrt{2}) \right] \sin \frac{\pi l_1}{a} \sin \frac{\pi l_2}{a} - \frac{1}{2} \ln \frac{\operatorname{ctg} \frac{\pi(l_2 - l_1)}{2a}}{\operatorname{ctg} \frac{\pi(l_2 + l_1)}{2a}} ; \quad (4.27)$$

$$C_3 = \left[2 - \frac{\pi r}{2a} (1 + \sqrt{2}) \right] \sin^2 \frac{\pi l_2}{a} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2a}{\pi r} \operatorname{tg} \frac{\pi l_2}{a} \right); \quad (4.28)$$

k — по формуле (4.24).

В волноводе с решетчатой диафрагмой из n стержней, расположенных на равном расстоянии друг от друга, возникают высшие типы волн, порядки которых определяются выражением [19]

$$m = 2\gamma(n+1) \pm 1, \quad (4.29)$$

где $\gamma = 1, 2, 3, \dots$

В волноводе возникают следующие типы волн:

при $n = 2$

5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43 и т. д.;

при $n = 3$

7, 9, 15, 17, 23, 25, 31, 33, 39, 41 и т. д.;

при $n = 4$

9, 11, 19, 21, 29, 31, 39, 41 и т. д.;

при $n = 5$

11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49 и т. д.

4.6. СКАЧОК ВЛНОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ

Скачок волновых сопротивлений в коаксиальной линии. Эквивалентная схема скачка волновых сопротивлений может быть представлена в виде стыка двух линий с волновыми сопротивлениями r_1 и r_2 , шунтированного емкостью

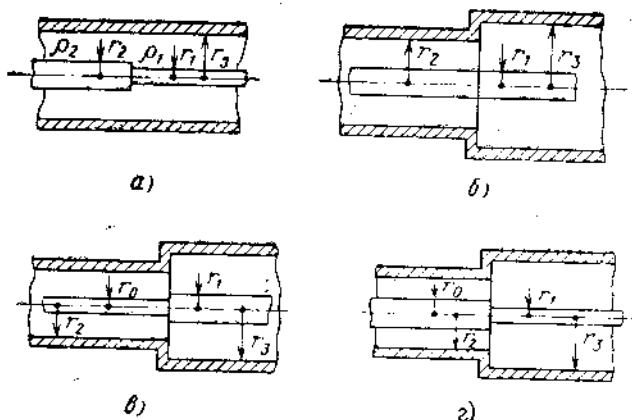


Рис. 4.47. Виды скачков волнового сопротивления в линии.

Количественные данные для эквивалентной емкости рассчитаны методом [7], основанным на использовании непрерывности тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей в плоскости неоднородности.

На рис. 4.47 показаны наиболее распространенные типы скачков волнового сопротивления линии. Обозначая эквивалентные емкости этих неоднородностей соответственно через C_a , C_b , C_c , C_d , имеем:

$$\left. \begin{aligned} C_a &= 2\pi r_3 C_1(\alpha, \beta), \quad \alpha = \frac{r_3 - r_2}{r_3 - r_1}, \quad \beta = \frac{r_3}{r_1}, \\ C_b &= 2\pi r_1 C_2(\alpha, \beta), \quad \alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_1}, \quad \beta = \frac{r_3}{r_1}, \\ C_c &= C'_a + C'_b, \\ C'_a &= 2\pi r_2 C_1(\alpha, \beta), \quad \alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_2 - r_0}, \quad \beta = \frac{r_2}{r_0}, \\ C'_b &= 2\pi r_1 C_2(\alpha, \beta), \quad \alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_1}, \quad \beta = \frac{r_3}{r_1}, \\ C_d &= \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}. \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

Вспомогательные функции $C_1(\alpha, \beta)$ и $C_2(\alpha, \beta)$, использованные в этих формулах, даны на рис. 4.48.

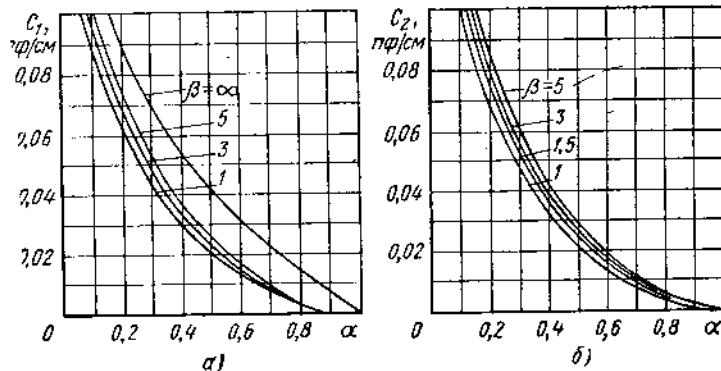


Рис. 4.48. Вспомогательные функции C_1 и C_2 для определения эквивалентных емкостей скачков волнового сопротивления.

Определенные по формулам (4.30) емкости справедливы для случая, когда вблизи рассматриваемой неоднородности нет никаких других неоднородностей (в противном случае появляется взаимное влияние).

модействие между волнами высших типов, возбуждаемых на близких друг к другу неоднородностях). Приведенные формулы для емкостей выведены в предположении, что поперечные размеры линии малы по сравнению с длиной волны. При укорочении волны вводится поправочный коэффициент k_1 (см. пример ниже), определяемый по графикам на рис. 4.49 в зависимости от отношения наибольшего зазора ($r_3 - r_1$) к длине волны.

Кривые на рис. 4.49, приведенные для двух значений отношения узкого зазора к широкому $\frac{r_3 - r_2}{r_3 - r_1}$ для рис. 4.47, а и $\frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_1}$ для рис. 4.47, б, показывают, что для длины волны, в 8–10 раз большей

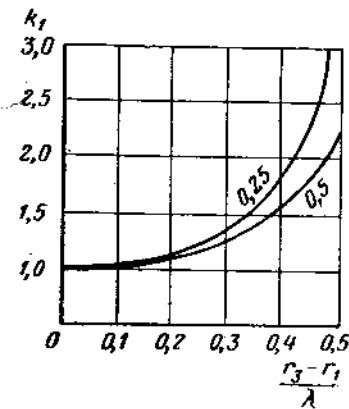


Рис. 4.49. Поправочный коэффициент в зависимости от отношения зазора к длине волны.

широкого зазора, $k = 1$ и только при приближении к полуволне k имеет заметную величину.

Пример. Для скачка волнового сопротивления на рис. 4.47, б имеем: $2r_1 = 4 \text{ мм}$; $r_2 - r_1 = 5 \text{ мм}$; $r_3 - r_1 = 10 \text{ мм}$. Необходимо определить эквивалентную емкость C при работе в линии с волной $\lambda = 5 \text{ см}$.

По кривой на рис. 4.48, б для $\alpha = 0,5$ и $\beta = 6$ находим $C_2 = 0,027 \text{ пФ/см}$; тогда $C_6 = 0,034 \text{ пФ}$. Так как

$$\frac{r_3 - r_1}{\lambda} = 0,2,$$

то из графика на рис. 4.49 найдем $k = 1,1$. Окончательно находим емкость скачка $C = kC_6 = 0,037 \text{ пФ}$.

Для волны 5 см эта емкость представляет собой реактивное сопротивление

$$\frac{1}{j\omega C} \approx 750 \text{ ом},$$

которое практически не влияет на работу в 50- или 75-омных линиях.

Расчет отражений от скачка волнового сопротивления проводится по приближенным формулам и по точным формулам, учитывающим реактивность скачка.

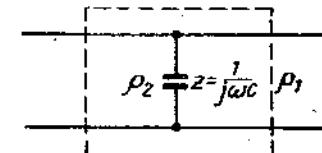
Приближенная формула для коэффициента отражения

$$\Gamma = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.31)$$

определяется лишь изменением волнового сопротивления.

Эффект действия высших типов волн выражается в виде сосредоточенной реактивности C , шунтирующей линию (рис. 4.50).

Рис. 4.50. Эквивалентная схема скачка волнового сопротивления в виде шунтирующей емкости.



Шунтирующая емкость C находится по формуле (4.30) и графику на рис. 4.48.

Точные формулы для собственных коэффициентов отражения и пропускания скачка волнового сопротивления:

$$\Gamma_t = |\Gamma_t| e^{j\theta} \text{ и } H = \frac{T_{11}}{T_{22}} = e^{j\varphi},$$

где

$$|\Gamma_t| = \sqrt{\frac{(\rho_2 - \rho_1)^2 + (\omega C \rho_1 \rho_2)^2}{(\rho_2 + \rho_1)^2 + (\omega C \rho_1 \rho_2)^2}}, \quad (4.32)$$

$$\theta = \arctg \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \omega C - \arctg \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \omega C;$$

$$\varphi = -2 \arctg \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \omega C;$$

H — коэффициент пропускания согласованного четырехполюсника.

Скачок волновых сопротивлений в волноводе. Применение понятия волнового сопротивления к волноводам весьма плодотворно при решении ряда задач, относящихся к ступенчатым фильтрам, плавным и ступенчатым переходам и др.

Скачок волновых сопротивлений (R) двух волноводов разного сечения можно определить из схемы рис. 3.19, б:

$$R = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(n_0^I)^2 Y_0^I}{(n_0^{II})^2 Y_0^{II}}, \quad (4.32, a)$$

где Y_0^I , Y_0^{II} — характеристические проводимости, определяемые по формуле (3.77);

n_0^I , n_0^{II} — коэффициенты идеального трансформатора, определяемые по формуле (3.86).

Для прямоугольных волноводов (рис. 3.20 и рис. 4.51) из формул (3.77), (3.88) и (4.32, а) следует

$$R = \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} - \frac{b_2}{b_1} - \frac{a_1}{a_2} f(a_1, a_2, x_0), \quad (4.32, б)$$

где

$$f(a_1, a_2, x_0) = \left[\frac{4 \sin \frac{\pi}{a_1} \left(x_0 + \frac{a_2}{2} \right) \cos \frac{\pi a_2}{2 a_1}}{\pi \left(\frac{a_1}{a_2} - \frac{a_2}{a_1} \right)} \right]^2.$$

Формула (4.32, б) является наиболее общей. Из этой формулы с различной степенью приближения могут быть получены

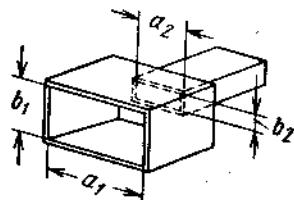


Рис. 4.51. Стык двух прямоугольных волноводов.

известные в литературе [2, 6, 17] упрощенные соотношения, приводимые далее.

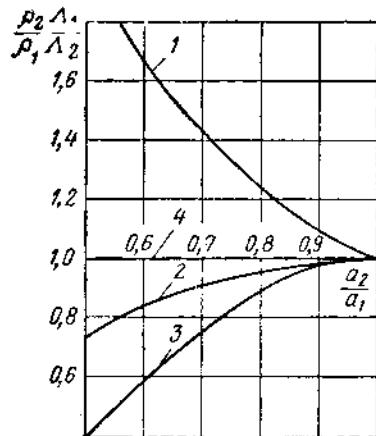
Так, например, для стыка двух незаполненных волноводов (рис. 4.51) с размерами a_1 , b_1 и a_2 , b_2 в соответствии с [2]

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{a_2}{a_1} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_2}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_1}\right)^2}}. \quad (4.33)$$

Рис. 4.52. Графики $\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2}$ в зависимости от отношения

сторон $\frac{a_2}{a_1}$

1—построена по формуле (4.34);
2—по формуле (4.35); 3—по формуле (4.36); 4—по формуле (4.37).



В случае $b_1 = b_2 = b$ имеем

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} = \frac{a_1}{a_2}. \quad (4.34)$$

Эта зависимость показана на рис. 4.52 (кривая 1). Для симметричного стыка двух прямоугольных волноводов (рис. 4.53, а) та же зависимость согласно [6] вычисляется по формуле

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} = \frac{a_2}{a_1} f_1 \left(\frac{a_2}{a_1} \right), \quad (4.35)$$

где $f_1(a_2/a_1)$ определяется по графикам [6].

На рис. 4.52 зависимость (4.35) иллюстрируется кривой 2.

Для несимметричного случая (рис. 4.53, б) кривая 3 (рис. 4.52) согласно [6] вычисляется по формуле

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} = \frac{a_2}{a_1} f_2 \left(\frac{a_2}{a_1} \right), \quad (4.36)$$

где $f_2(a_2/a_1)$ определяется по графикам [6].

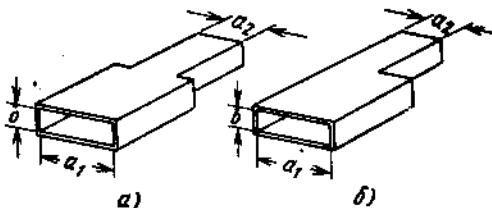


Рис. 4.53. Стык двух прямоугольных волноводов в плоскости Н:
а—симметричный случай; б—несимметричный случай.

Кривая 4 (совпадающая с осью абсцисс) на рис. 4.52 согласно [17] определяется по формуле

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} = 1. \quad (4.37)$$

Этому соотношению соответствует определение волнового сопротивления волны H_{10} в виде

$$\rho = C \frac{b}{\gamma}, \quad (4.38)$$

где γ — волновое число в волноводе: $\gamma = \frac{2\pi}{\Lambda}$;

C — постоянная, не зависящая от a и b . Выражение для коэффициента отражения от стыка

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta b}{b} - \frac{\Delta a}{a} \cdot \frac{\pi^2}{a^2 \gamma^2} \right). \quad (4.39)$$

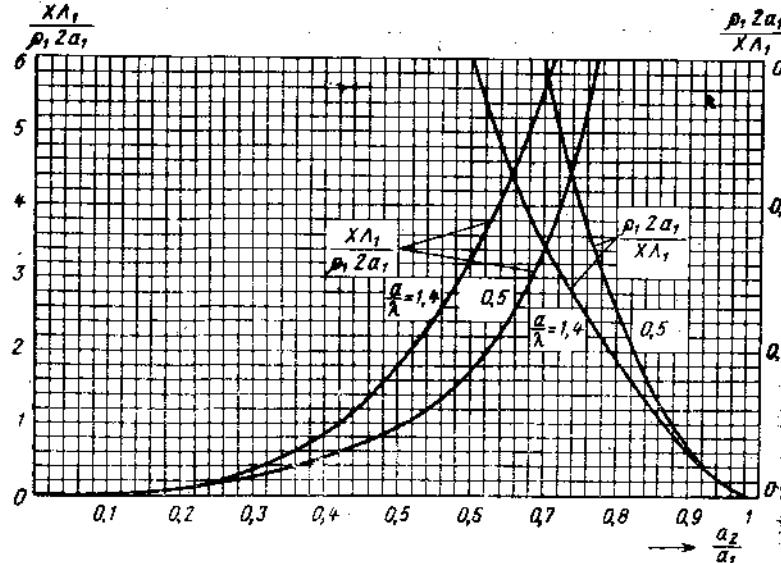


Рис. 4.54. Эквивалентное шунтирующее реактивное сопротивление для Н-плоскостного соединения прямоугольных волноводов (симметричный случай).

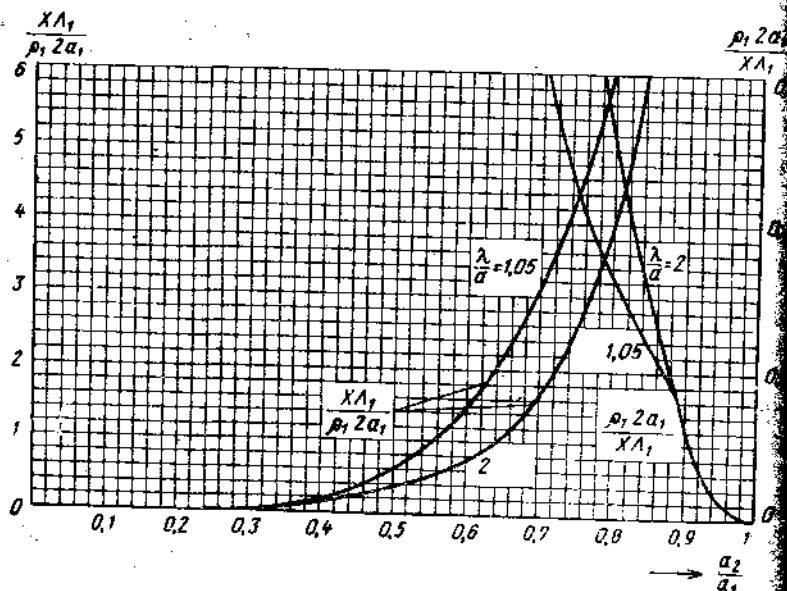


Рис. 4.55. Эквивалентное шунтирующее реактивное сопротивление для Н-плоскостного соединения прямоугольных волноводов (асимметричный случай).

В приведенных выше формулах не учтены дифракционные явления на стыке двух волноводов, которые учитываются эквивалентной проводимостью, нормированная величина которой для случая изменения ширины волновода дана на рис. 4.54 [6, рис. V-77, стр. 305] для симметричного случая и на рис. 4.55 [6, рис. V-80, стр. 309] для асимметричного случая. На рис. 4.56 [6, рис. V-85, стр. 314] дана эквивалентная приведенная проводимость для скачкообразного изменения высоты прямоугольного волновода (асимметричный случай).

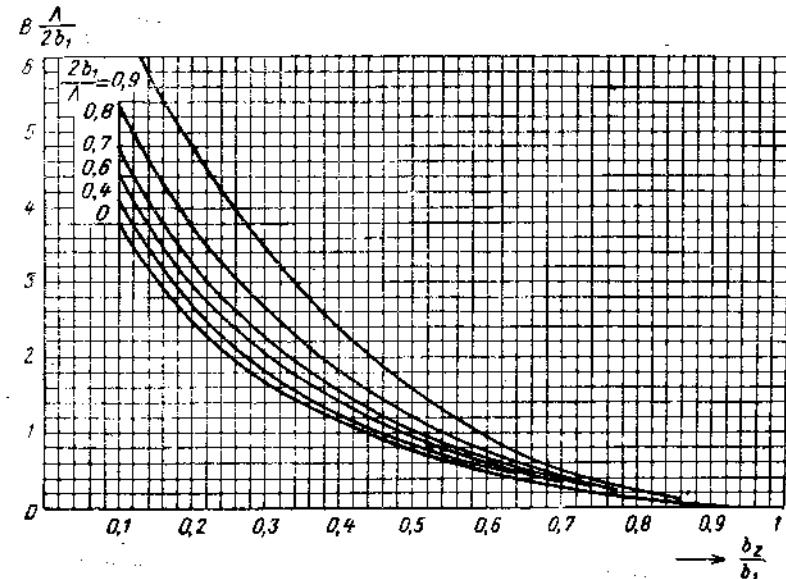


Рис. 4.56. Эквивалентная приведенная реактивная проводимость B для скачкообразного изменения высоты прямоугольного волновода (асимметричный случай).

С достаточной для практики точностью можно пользоваться для подсчета перепада R волнового сопротивления прямоугольных волноводов, возбужденных на волне H_{30} , формулой

$$R = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{b_2 \Lambda_2}{b_1 \Lambda_1}. \quad (4.40)$$

Соотношение (4.40) будет использовано при расчете ступенчатых переходов.

4.7. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОСТЕЙШИХ РЕЗОНАТОРОВ

Объемные резонаторы диапазона СВЧ, так же как и обычные резонансные LC -контуры, удобно характеризовать с помощью понятий нагруженной и собственной добротности.

Нагруженная добротность (Q_H) резонатора имеет несколько определений [5, 20].

1. Энергетическое определение:

$$Q_H = 2\pi \frac{W_{\text{накопл}}}{(W_{\text{расс}})_T}, \quad (4.41)$$

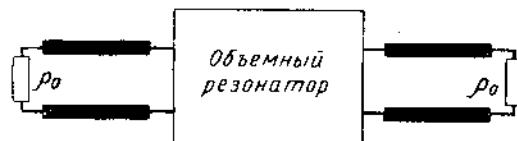


Рис. 4.57. Схема включения объемного резонатора в линию.

где $W_{\text{накопл}}$ — энергия, накопленная в контуре;
 $(W_{\text{расс}})_T$ — энергия, рассеянная за период.

2. Фазовое определение:

$$Q_H = \left(\frac{d\Phi}{d\eta} \right)_{\eta=0}, \quad (4.42)$$

где Φ — фазовая характеристика коэффициента передачи (T_{11}) резонатора, включенного в схему рис. 4.57¹;

$\eta = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$ — обобщенная расстройка,

при $f = f_0$ (т. е. на резонансной частоте) $\eta = 0$.

3. Амплитудное определение:

$$Q_H = \frac{1}{\frac{f_{\text{зат}}}{f_0} - \frac{f_0}{f_{\text{зат}}}} \approx \frac{f_0}{2(\Delta f)_{\text{зат}}}, \quad (4.43)$$

где f_0 — резонансная частота;

$f_{\text{зат}}$ — частота, при которой рабочее затухание ($10 \lg |T_{11}|^2$) достигает 3 дБ.

¹ Подробнее см. гл. 1.

Для измерительных целей наиболее удобны два последних определения.

Во многих случаях объемный резонатор можно рассматривать как отрезок регулярной передающей линии, ограниченный с двух сторон реактивными неоднородностями B (элементами связи, нагрузкой и генератором, рис. 4.58). Добротность такой системы определяется коэффициентами отражения ($\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma$) от левого и правого концов контура и расстоянием (в полуволнах) между концевыми неоднородностями [20].

Нагруженная добротность такой системы определяется по формуле [19, 20]

$$Q_H = n\pi \frac{|\Gamma|}{1 - |\Gamma|^2} \left(\frac{\Lambda_0}{\lambda_0} \right)^2, \quad (4.44)$$

где λ_0 — резонансная длина волны в открытом пространстве;
 Λ_0 — резонансная длина волны в волноводе;
 n — число полуволн ($\Lambda_0/2$) вдоль резонатора.



Рис. 4.58. Эквивалентная схема объемного резонатора

Модификация формулы (4.44) дана в гл. 8 [см. формулу (8.15)].

Ненагруженный резонатор характеризуется величиной собственной добротности Q_0 , связанной с величиной собственных потерь в резонаторе.

Для схемы рис. 4.58 собственная добротность может быть определена при $\Gamma \rightarrow \pm 1$ [20]; формула имеет вид

$$Q_0 = \pi \frac{e^{-2\alpha l}}{1 - (e^{-2\alpha l})^2} \approx \frac{\beta}{2\alpha}. \quad (4.45)$$

Таким образом, фазовая постоянная β любой передающей линии, деленная на ее удвоенную постоянную затухания (α) имеет физический смысл собственной добротности полуволнового отрезка этой линии, короткозамкнутого на концах.

При расчете более сложных типов резонаторов следует учитывать потери в закорачивающих поверхностях.

Формулы для расчета параметров некоторых типов объемных резонаторов сведены в табл. 4.4 [3, 12, 13, 14].

Собственная добротность участка прямоугольного волновода, ограниченного с двух сторон одинаковыми штыревыми решетками (с учетом потерь в этих решетках [21]), дана на графиках рис. 4.59, а, б в зависимости от Q_H . Резонаторы такого типа широко применяются в СВЧ фильтрах (см. гл. 8).

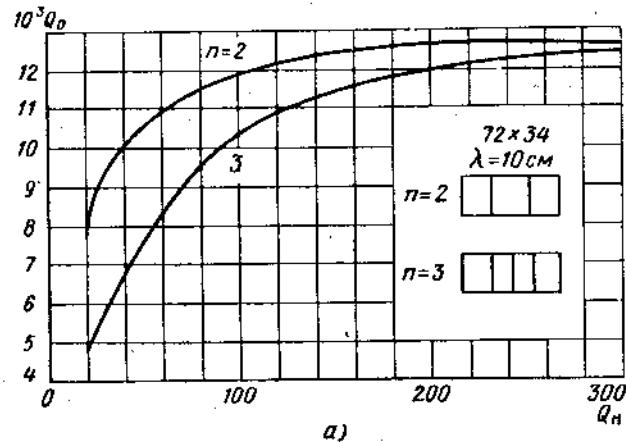
Таблица 4.4

Формулы для расчета параметров некоторых типов объемных резонаторов

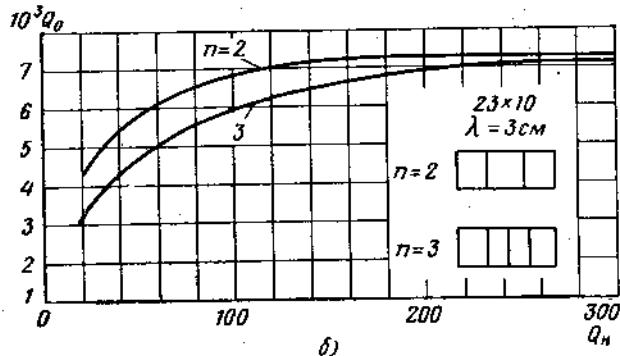
Тип резонатора	Тип колебаний	Резонансная длина волны в воздухе λ_0	Собственная добротность неизгруженного резонатора Q_0
	H_{10n} (TE _{10n})	$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{d^2} + \frac{n^2}{L^2}}}$, где $L = n \frac{\Delta}{2}$;	$Q_0 = \frac{\pi \delta \sigma}{b} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] + \frac{4}{n} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{3/2},$ где δ — глубина проникновения тока, см; ρ — удельное сопротивление, ом см; λ — длина волны, см; μ — магнитная проницаемость; σ — удельная проводимость, см ³ /см, дана в табл. 3.3
	E_{010} (TM ₀₁₀)	$\lambda_0 = 2,62R$	$Q_0 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{2,405}{2\pi \left(1 + \frac{R}{L} \right)}$
	H_{01n} (TE _{01n})	$\lambda_0 = \frac{2L}{\sqrt{\frac{1}{n^2} + 1,48 \left(\frac{L}{R} \right)^2}}$	$Q_0 = 0,37 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 + \frac{4}{n} \left[1 - 0,37 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^2 \right]^{3/2}$
<i>Цилиндрический</i>			
a) Замкнутый с обеих сторон	TEM	$\lambda_0 = \frac{2L}{n}$	$Q_0 = \left[\frac{\lambda}{R} \left(\frac{1}{n^2} + \frac{1}{R^2} \right) + 8n \right]$
b) Кольцевой с обеих сторон	TEM	$\lambda_0 = \frac{4L}{2n+1}$	

Связь между рабочим затуханием резонатора (см. схему рис. 4.57), его нагруженной добротностью Q_n и собственной добротностью Q_0 определяется соотношением

$$b (\text{дБ}) = 10 \lg \left(\frac{Q_0}{Q_0 - Q_n} \right)^2. \quad (4.46)$$



a)



b)

Рис. 4.59. Графики зависимости собственной добротности от нагруженной добротности участка прямоугольного волновода, ограниченного штыревыми решетками:

а—для волновода (72×34) мм; б—для волновода (23×10) мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорохов А. П. Расчет и конструирование антенно-фидовых устройств. Изд. Харьковского университета, 1960.
2. Линии передачи сантиметровых волн, под ред. Г. А. Ремеза, т. I и II. Изд-во «Советское радио», 1951.
3. Мейнке Х. и Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Госэнергоиздат, 1960.
4. Саусворт Д. К. Принципы и применение волноводной передачи. Изд-во «Советское радио», 1955.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Госэнергоиздат, 1962.
6. «Справочник по волноводам». Пер. под ред. Я. Н. Фельда. Изд-во «Советское радио», 1952.
7. Whinnety G. R., Jamieson H. W., Robbins T. E. Неоднородности в коаксиальных линиях. Proc. IRE, 1944, v 32.
8. Кощеев И. А. Основы теории электрической связи. Связьиздат, 1954.
9. Андерсон Прямоугольный волновод и волноводы типов П и Н. «Вопросы радиолокационной техники», 1957, 6 (42).
10. Фельдштейн А. Л. и Явич Л. Р. Вопросы широкополосного согласования некоторых типов комплексных сопротивлений на СВЧ. «Радиотехника и электроника», 1959, № 12.
11. Изюмова Т. И. и Свиридов В. Т. Полые и ленточные радиоволноводы. Госэнергоиздат, 1960.
12. Гуревич А. Г. Полые резонаторы и волноводы. Изд-во «Советское радио», 1952.
13. Новоженов Г. Ф. Объемные резонаторы. Воениздат, 1958.
14. Ширман Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. Связьиздат, 1959.
15. Gruenberg H. Symmetrically Placed Inductive Posts in Rectangular Waveguide. Can J. Physics, 1952, v. 30, № 3, p. 211—217.
16. Graven G., Levin L. Design of Microwave Filters with Quarter-Wave Couplings. Proc. Inst. of Electrical Engineers, pt. B, v. 103, № 8, 1956.
17. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. Изд. АН СССР, 1961.
18. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. Госэнергоиздат, 1963.
19. Модель А. М., Белевич Н. С. Расчет нагруженных добротностей волноводных резонаторов, образованных решетчатыми диафрагмами. «Радиотехника», 1963, т. 18, № 9.
20. Фельдштейн А. Л. Об энергетическом режиме высокочастотной линии передачи. «Радиотехника», 1949, т. 4, № 4.
21. Модель А. М. Потери в волноводных фильтрах. Сб. трудов НИИ министерства связи, вып. 4 (28), 1962.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

5.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ

Полосковая линия передачи представляет собой проводник (ленточного или круглого сечения), расположенный на некотором расстоянии от металлической плоскости (основания) или заключенный между двумя основаниями.

Полосковые линии передачи можно рассматривать как разновидность коаксиальной либо двухпроводной линий в зависимости от

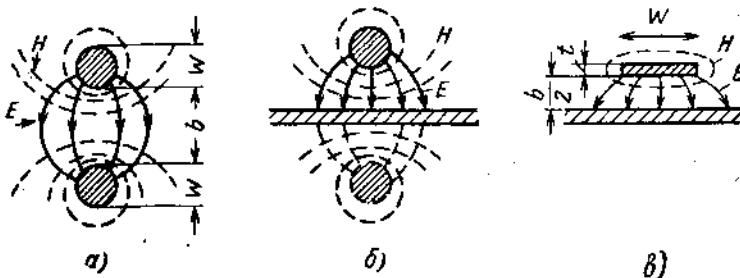


Рис. 5.1. Преобразование двухпроводной линии в несимметричную полосковую линию:

а—две проводники; *б*—один проводник с зеркальным изображением; *в*—несимметричная полосковая линия.

положения проводника относительно заземленной проводящей плоскости. На рис. 5.1 показано преобразование двухпроводной линии в несимметричную полосковую линию, а на рис. 5.2—преобразование коаксиальной линии в симметричную полосковую линию.

Для полосковых линий передачи можно использовать технику печатных схем, что позволяет сократить размеры и вес СВЧ устройств. На рис. 5.3 и 5.4 показаны разновидности полосковых линий передачи.

Наибольшее применение имеют следующие линии:

1) симметричная полосковая линия с прямоугольным внутренним проводником и воздушным заполнением (рис. 5.4, *a*);

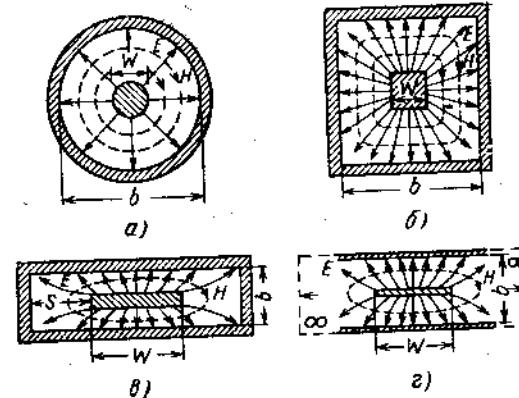


Рис. 5.2. Преобразование коаксиальной линии в симметричную полосковую линию:

а—коаксиальная линия; *б*—квадратная линия; *в*—прямоугольная линия; *г*—симметричная полосковая линия.

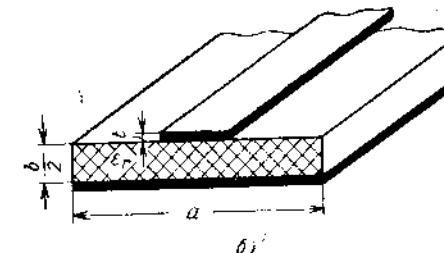
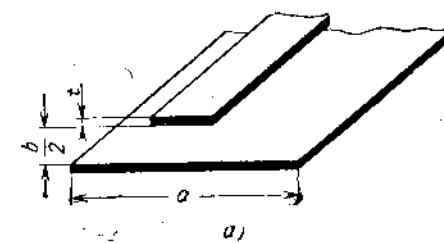


Рис. 5.3. Несимметричные полосковые линии:

а—с воздушным заполнением; *б*—с диэлектрическим заполнением.

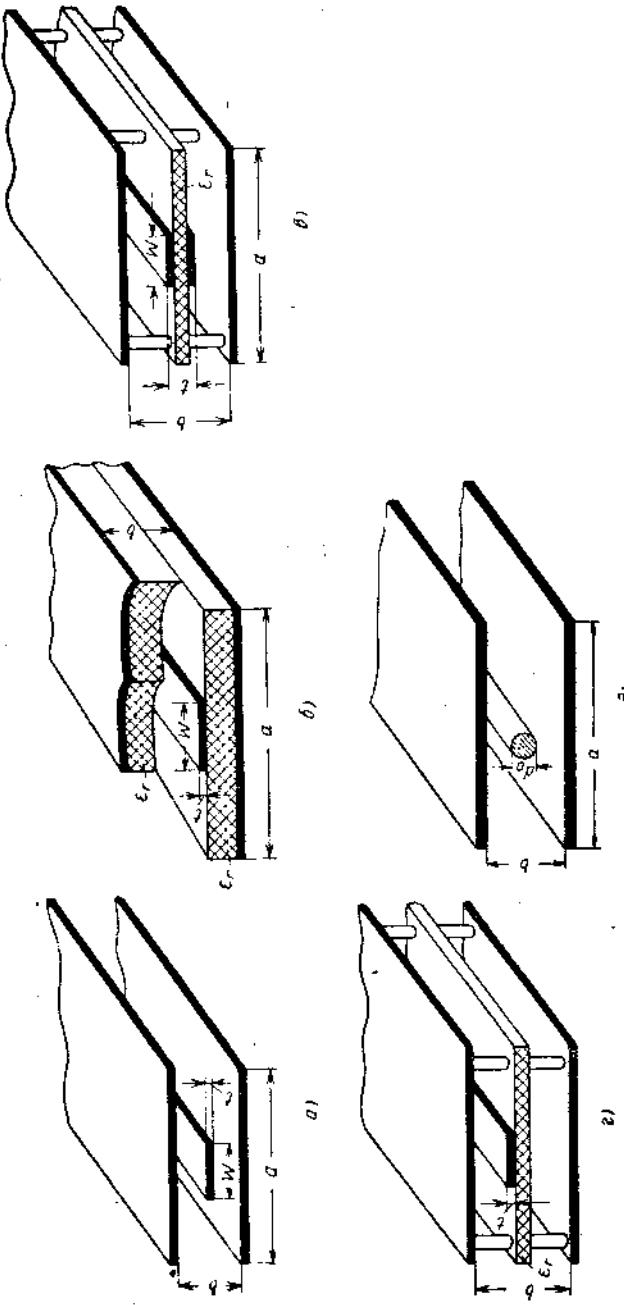


Рис. 5.4. Симметричные полосковые линии:
 α — с прямогольным внутренним проводником и воздушным заполнением; β — с диэлектрическим заполнением; δ — с опорным диэлектрическим листом с двухсторонним проводником на нем; γ — с опорным диэлектрическим листом с односторонним проводником на нем; δ — с круговым вытеснением проводников.

2) симметричная печатная полосковая линия с диэлектрическим заполнением (рис. 5.4, β);
 3) полосковая линия с опорным диэлектрическим листом с двухсторонним (рис. 5.4, δ) или односторонним проводниками на нем (рис. 5.4, γ).

5.2. ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАЗМЕРЫ

Для существования только основного типа волны TEM в полосковой линии необходимо ввести ограничения на ее размеры и симметрию [1, 2, 5, 6, 7]:

1. Расстояние b между основаниями должно быть меньше половины длины волны ($b < \lambda/2$).

2. Эквивалентная электрическая ширина центрального проводника должна быть меньше половины длины волны (электрическая ширина проводника превышает физическую ширину из-за краевых явлений на ребрах).

Наклон центрального проводника весьма критичен в системах с высокой добротностью. Для уменьшения требований к наклону используют металлические перемычки (устанавливаемые на расстоянии около $\lambda/4$ друг от друга) и барьеры, препятствующие распространению высших типов волн между основаниями. Увеличение ширины полосы (w) и расстояния между основаниями (b) уменьшает потери в системе [1, 8].

Если расстояние между основаниями меньше четверти длины волны, то затухание высших типов волн в поперечном направлении будет [1, 7]

$$\alpha_t = \frac{27}{b} \cdot \frac{\partial b}{\text{ед. длины}}. \quad (5.1)$$

Парезитная связь между двумя соседними полосковыми линиями отсутствует, если затухание в поперечном направлении составляет [6] ($60 \div 65$) дБ/см , тогда из (5.1) следует, что проводники двух симметричных линий должны быть разнесены на расстояние

$$s > (2 \div 3) b. \quad (5.2)$$

Расчеты полосковых линий основаны на предположении, что размеры оснований (длина и ширина) бесконечны, однако они с достаточно хорошим приближением справедливы и для конечных оснований, до тех пор пока электрическое поле на краю пластинки мало по сравнению с однородным электрическим полем в области между центральным проводником и основанием. В этом случае можно считать, что ширина основания (рис. 5.4).

$$a > w + 2b. \quad (5.3)$$

При выборе размеров полосковой линии необходимо учитывать максимально допустимое затухание (см. § 5.4) и пропускаемую мощность (см. § 5.5).

5.3. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Волновое сопротивление ρ и скорость распространения v для волн типа TEM в полосковой линии определяются, как и в коаксиальной линии, по формулам

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5.4)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{V \mu_a \epsilon_a}, \quad (5.5)$$

где L и C — индуктивность и емкость на единицу длины.

Связь между абсолютными (μ_a , ϵ_a) и относительными (μ_r , ϵ_r) значениями магнитной и диэлектрической проницаемости среды имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \mu_a &= \mu_0 \mu_r, \\ \epsilon_a &= \epsilon_0 \epsilon_r. \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

В практической системе единиц

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{1}{36\pi 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12}, \frac{\phi}{м}; \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6}, \frac{зН}{м}; \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

$$\rho = \frac{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{3 \cdot 10^8 C}, \text{ ом}; \quad (5.8)$$

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}, \frac{м}{сек}, \quad (5.9)$$

где C — емкость на единицу длины, $\phi/м$.

В первом приближении емкость линии, определяющая ее волновое сопротивление, может быть вычислена по формуле для плоского конденсатора. Это применимо для линий, у которых емкость не менее 150 пф/м [6].

При меньших значениях емкости нужно учитывать емкость краевого поля C_f (рис. 5.5):

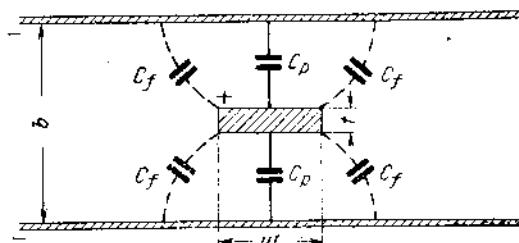


Рис. 5.5. Упрощенная схема плоского конденсатора из трех параллельных пластин.

$$\frac{C}{\epsilon_a} = 2 \frac{C_p}{\epsilon_a} + 4 \frac{C_f}{\epsilon_a}, \quad (5.10)$$

где C_p — емкость плоского конденсатора (см. § 5.7);

C_f — емкость краевого поля (см. § 5.7).

СИММЕТРИЧНАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ

Для линий передачи с волновым сопротивлением, меньшим 25 ом [1, 6, 10], при расчетах можно пользоваться формулой для плоского конденсатора из трех параллельных пластин

$$\frac{C}{\epsilon_a} = \frac{2C_p}{\epsilon_a} = \frac{\frac{4}{b} \frac{w}{t}}{1 - \frac{t}{b}}, \quad (5.11)$$

где w — ширина центрального проводника, см;
 b — расстояние между основаниями, см;
 t — толщина центрального проводника, см.

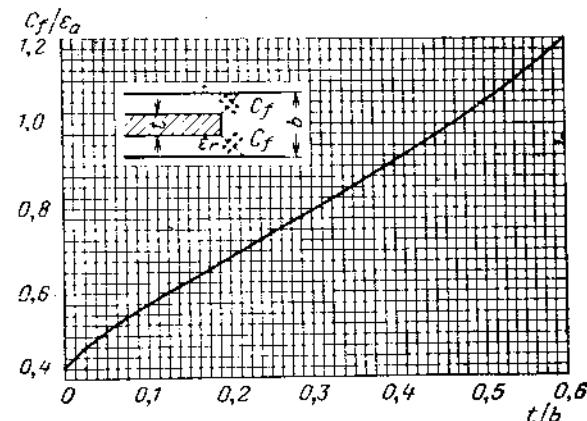


Рис. 5.6. График краевой емкости полубесконечной пластины, помещенной между основаниями.

Волновое сопротивление определяется по формулам (5.8) и (5.11).

Для линий передачи с волновым сопротивлением в пределах $[2] 25 \text{ ом} < \rho < 100 \text{ ом}$ необходимо учитывать емкость краевого поля (рис. 5.5).

Формула для C_f/ϵ_a , найденная с помощью конформного отображения [2], имеет вид

$$\frac{C_f}{\epsilon_a} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{2}{1 - \frac{t}{b}} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{t}{b}} + 1 \right) - \left(\frac{1}{1 - \frac{t}{b}} - 1 \right) \ln \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{t}{b} \right)^2} - 1 \right] \right\}. \quad (5.12)$$

Выражение (5.12) представлено графически на рис. 5.6.

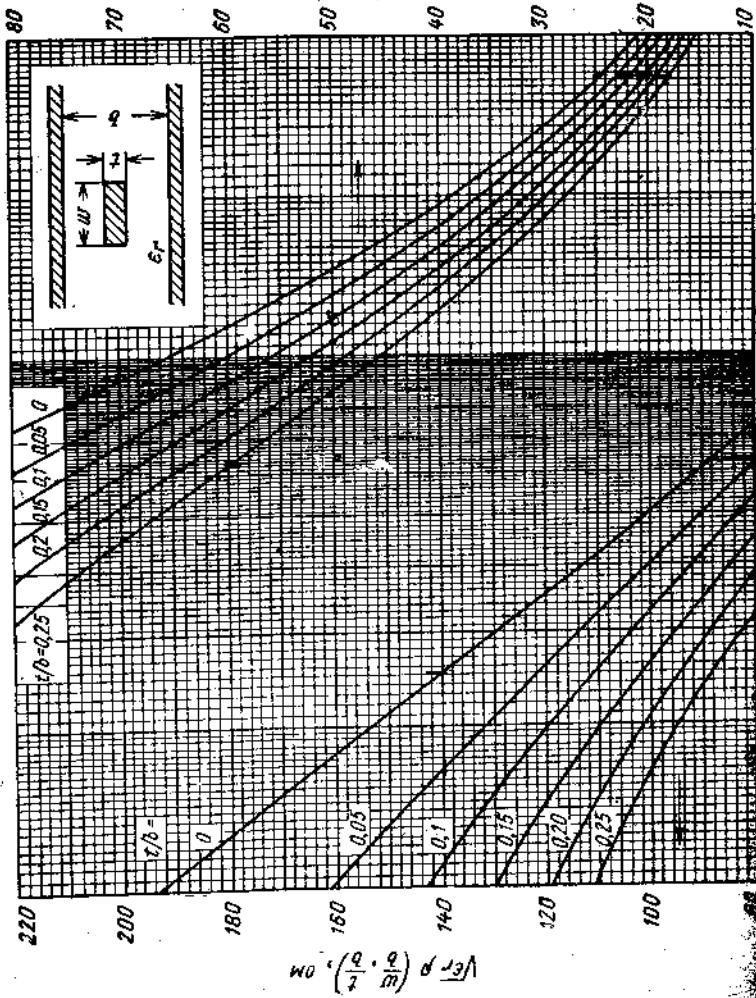


Рис. 5.7. График зависимости волнового сопротивления симметричной полосковой линии от $\frac{w}{b}$ для различных

Волновое сопротивление одиночной симметричной полосковой линии с центральным проводником конечной толщины [2] можно определить из формул (5.8) — (5.12):

$$p\left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}\right) = \frac{30\pi}{V_{\epsilon_r} \left(\frac{w}{b} + \frac{C_f}{\epsilon_a} \right)}, \text{ ом.} \quad (5.13)$$

Эта формула применима для $\frac{w}{b} - t \geq 0,35$ (широкий центральный проводник).

На рис. 5.7 дан график [2, 8] зависимости $p\left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}\right)$ от $\frac{w}{b}$ при различных значениях $\frac{t}{b}$. На этом рисунке кривая для $\frac{t}{b} = 0$ точная, ее точки вычисляются с помощью формулы [2, 11]

$$p\left(\frac{w}{b}, 0\right) = \frac{30\pi K(k)}{K(k')}, \quad (5.14)$$

где $K(k)$ и $K(k')$ — полные эллиптические интегралы первого рода [12];

$$k = \operatorname{sch} \frac{\pi w}{2b}; \quad k' = \operatorname{th} \frac{\pi w}{2b}. \quad (5.15)$$

На рис. 5.7 даны также кривые для случая узкой полоски $\frac{w}{b} < 0,35$. При этом $p\left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}\right)$ вычисляется по приближенной формуле (5.16) для линии, в которой прямоугольный проводник заменен круглым (рис. 5.8); принимается, что погонная индуктивность у линии, состоящей из прямоугольного центрального проводника и круглого проводника диаметром d_0 , одна и та же:

$$p\left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}\right) = \frac{60}{V_{\epsilon_r}} \ln \frac{4b}{\pi d_0}, \text{ ом,} \quad (5.16)$$

где связь между d_0 и t находится по графику рис. 5.9. При $t=0$ имеем $d_0 = \frac{w}{2}$ и

$$p\left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}\right) = \frac{60}{V_{\epsilon_r}} \ln \frac{8b}{w\pi}, \text{ ом.} \quad (5.17)$$

Приближенные формулы для вычисления волнового сопротивления симметричной полосковой линии дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными для малых значений величин $\frac{t}{b}$.

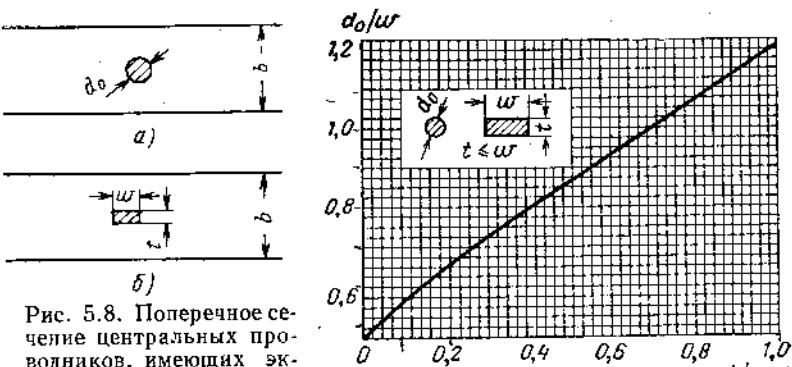


Рис. 5.8. Поперечное сечение центральных проводников, имеющих эквивалентные волновые сопротивления:

а—линия с круглым проводником; б—линия с прямоугольным полупроводником.

Рис. 5.9. График соотношения между размерами круглого и прямоугольного поперечного сечения центрального проводника в симметричной линии.

Для значений $\frac{t}{b} > 0,25$ и $\frac{w}{b} < 0,1$ необходимо применять точные формулы, приведенные в работе [2,13]; результат расчета по этим формулам приведен на графике рис. 5.10. Здесь дана зависимость $\frac{t}{b}$ от $\frac{w}{b}$ для значений $V_{\epsilon_r} \rho \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b} \right)$ от 10 до 200 ом.

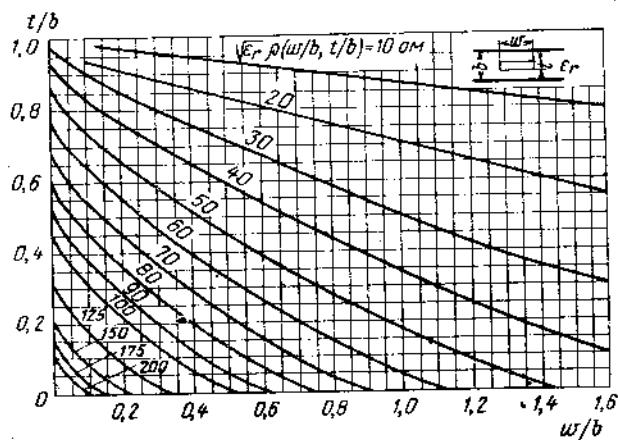


Рис. 5.10. График зависимости $\frac{t}{b}$ от $\frac{w}{b}$ для симметричной полосковой линии с различными волновыми сопротивлениями.

Силовые линии поля в симметричной полосковой линии для широкого и узкого центральных проводников даны на рис. 5.11, а и б соответственно.

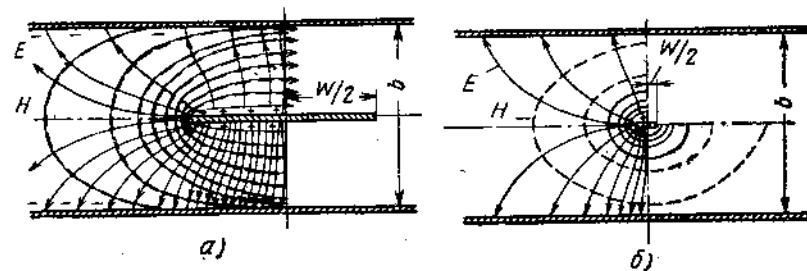


Рис. 5.11. Силовые линии поля в симметричной полосковой линии:
а—широкий центральный проводник, $\frac{w}{b} = 1$; б—узкий центральный проводник $\frac{w}{b} = 0,1$.

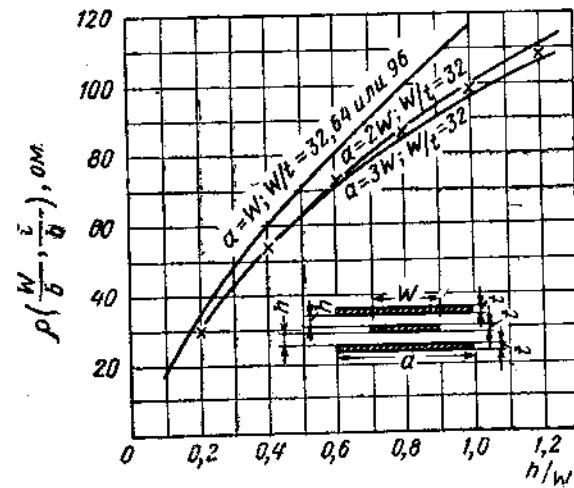


Рис. 5.12. Волновое сопротивление симметричной полосковой линии с воздушным заполнением:

— измерения в электролитической ванне,
Х — точки из кривой рис. 5.7.

Экспериментальное определение волнового сопротивления симметричной полосковой линии, проведенное в электролитической ванне [2, 11], результаты которого приведены на рис. 5.12, показывает удовлетворительное совпадение с волновым сопротивлением, определяемым по графику рис. 5.7 [2, 8].

НЕСИММЕТРИЧНАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ

Емкость и волновое сопротивление несимметричной полосковой линии (рис. 5.3) определяются по приближенным формулам [4, 6]:

a) при малых конечных значениях t

$$C = 17,7 \epsilon_r \left\{ 1 + \frac{w}{b} + \frac{1}{\pi} \frac{t}{b} \left[1 + \ln \left(1 + \frac{b}{t} \right) \right] \right\} \frac{n\phi}{m}, \quad (5.18)$$

$$\rho = \frac{188}{V \epsilon_r} \frac{1}{1 + \frac{w}{b} + \frac{1}{\pi} \frac{t}{b} \left[1 + \ln \left(1 + \frac{b}{t} \right) \right]}, \text{ ом}; \quad (5.19)$$

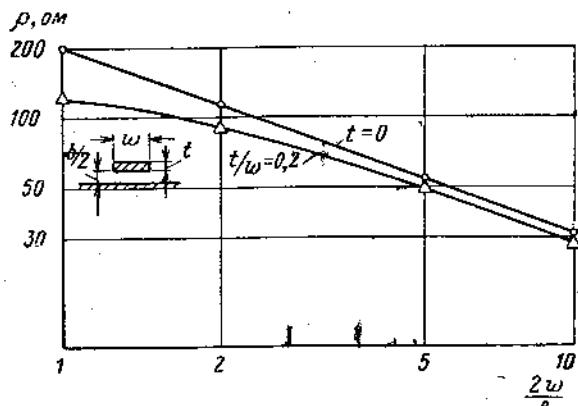


Рис. 5.13. График волнового сопротивления несимметричной полосковой линии.

б) при $t = 0$ над бесконечным основанием при большом значении $\frac{2w}{b}$

$$C = 17,7 \epsilon_r \left\{ \frac{w}{b} + \frac{1}{\pi} \left[1 + \ln \left(1 + \frac{\pi w}{b} \right) \right] \right\}, \frac{n\phi}{m}. \quad (5.20)$$

$$\rho = \frac{188}{V \epsilon_r} \frac{1}{\frac{w}{b} + \frac{1}{\pi} \left[1 + \ln \left(1 + \frac{\pi w}{b} \right) \right]}, \text{ ом}. \quad (5.21)$$

Волновое сопротивление в основном определяется отношением $\frac{2w}{b}$ и в меньшей степени параметром $\frac{t}{w}$.

Зависимость волнового сопротивления несимметричной полосковой линии от ее геометрических размеров показана на рис. 5.13 [1].

5.4. ЗАТУХАНИЕ И ДОБРОТНОСТЬ

Затухание в полосковой линии передачи зависит от потерь в проводниках и диэлектрических потерь:

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_G, \quad (5.22)$$

где α_R — затухание, обусловленное потерями в проводниках;

α_G — затухание, обусловленное потерями в диэлектрике.

Затухание за счет диэлектрических потерь [1, 6]

$$\alpha_G = \frac{27,3 \sqrt{\epsilon_r} \operatorname{tg} \delta}{\lambda} \cdot \frac{\partial b}{m}, \quad (5.23)$$

где λ — длина волны в свободном пространстве, м;

ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей линию;

$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь среды, заполняющей линию;

$\alpha_G = 0$ для линии с воздушным заполнением.

Для симметричной линии с широким внутренним проводником

$$\left(\frac{w}{b-t} \geq 0,35 \right) [1, 6]$$

$$\alpha_R = \frac{0,244 R_s \epsilon_r \rho}{b} \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{1 - \frac{t}{b}} + \frac{2 \frac{w}{b}}{\left(1 - \frac{t}{b} \right)^2} + \frac{1}{\pi} \frac{\left(1 + \frac{t}{b} \right)}{\left(1 - \frac{t}{b} \right)^2} \ln \left(\frac{2b}{t} - 1 \right) \right\}, \frac{\partial b}{m}, \quad (5.24)$$

где R_s — поверхностное сопротивление, $\text{ом}/\text{м}^2$;

b — расстояние между пластинами, мм.

Для меди

$$R_s = 8,25 \cdot 10^{-3} \sqrt{f}, \frac{\text{ом}}{\text{м}^2}, \quad (5.25)$$

где f — частота, Гц;

$$\alpha_R = \frac{2,02 \cdot 10^{-3} \epsilon_r \rho \sqrt{f}}{b} \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{1 - \frac{t}{b}} + \frac{2 \frac{w}{b}}{\left(1 - \frac{t}{b}\right)^2} + \frac{1}{\pi} \frac{1 + \frac{t}{b}}{\left(1 - \frac{t}{b}\right)^2} \ln \left(\frac{2b}{t} - 1 \right) \right\}, \frac{\partial \delta}{m}. \quad (5.26)$$

Для симметричной линии с узким внутренним проводником

$$\frac{w}{b-t} < 0,35 \quad \text{и} \quad \frac{t}{b} < 0,25$$

$$\alpha_R = \frac{1,38 \cdot 10^3 R_s}{\rho b} \left\{ 1 + \frac{b}{d_0} \left[\frac{1}{2} + 0,669 \frac{t}{w} - 0,255 \left(\frac{t}{w} \right)^2 + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi w}{t} \right] \right\}, \frac{\partial \delta}{m}. \quad (5.27)$$

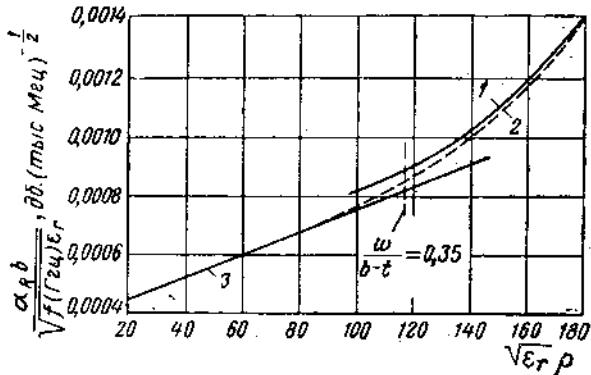


Рис. 5.14. Графическое сравнение формул для затухания в случае широкой и узкой полосок в их переходной области:

1 — по формуле для узкой полоски; 2 — составная кривая;
3 — по формуле для широкой полоски.

Для медных проводников

$$\alpha_R = \frac{11,4 \sqrt{f}}{\rho b} \left\{ 1 + \frac{b}{d_0} \left[\frac{1}{2} + 0,669 \frac{t}{w} - 0,255 \left(\frac{t}{w} \right)^2 + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi w}{t} \right] \right\}, \frac{\partial \delta}{m}, \quad (5.28)$$

где d_0 — эквивалентный диаметр, определяемый по графику рис. 5.9.

Сравнение формулы (5.26) для широкой полоски и формулы (5.28) для узкой полоски вблизи переходной области $\frac{w}{b-t} = 0,35$

для случая $\frac{t}{b} = 0,01$ проведено в работе [1, 8] и показано на

рис. 5.14. Составная кривая 2 отличается от истинной на несколько процентов. Семейство таких составных кривых затухания в зависимости от ρ для различных значений $\frac{t}{b}$ дано на рис. 5.15 [1, 8].

Полное затухание линии, заполненной диэлектриком,

$$\alpha = \alpha_R + \frac{27,3 \sqrt{\epsilon_r} \operatorname{tg} \delta}{\lambda}, \frac{\partial \delta}{\text{ед. длины}}. \quad (5.29)$$

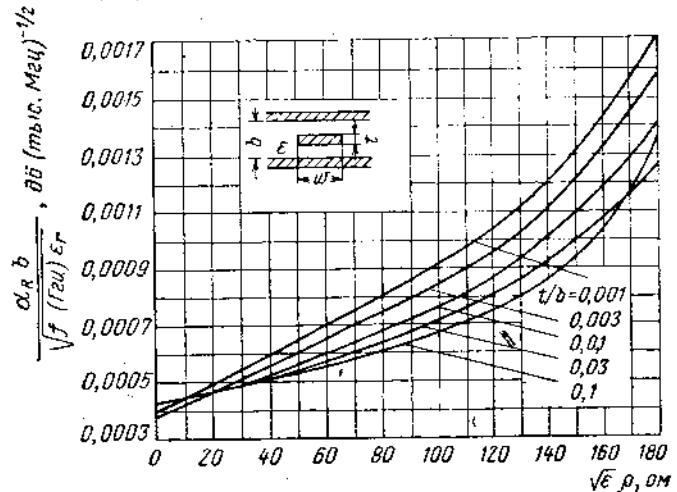


Рис. 5.15. Теоретические кривые затухания в медной симметричной полосковой линии с диэлектрическим заполнением.

Затухание за счет потерь в проводниках несимметричной линии определяется по формуле [4, 6]

$$\alpha_R = 2,9 \frac{\sqrt{\epsilon_r R f (\Gamma \text{Гц})} \left(1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi w}{b} + \ln \frac{p-1}{4} \right)}{b \left[1 + \frac{\pi w}{b} + \ln \left(1 + \frac{\pi w}{b} \right) \right]}, \frac{\partial \delta}{m}, \quad (5.30)$$

где R — удельное сопротивление материала проводников, $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{м}$;

$\frac{b}{2}$ — расстояние между проводниками несимметричной линии, $мм$;

$$p = 2 \left(1 + \frac{2t}{b} \right)^2 - 1 + 2 \left(1 + \frac{2t}{b} \right) \sqrt{\left(1 + \frac{2t}{b} \right)^2 - 1}. \quad (5.31)$$

Экспериментальные величины затухания в полосковых линиях несколько отличаются от расчетных, так как во всех приведенных

выше формулах не учитываются потери из-за шероховатости проводников, наличия технологических пленок под фольгой, влагопроницаемости диэлектриков.

В связи с большими успехами по созданию диэлектриков с малым тангенсом угла потерь печатные полосковые симметричные линии с диэлектрическим заполнением получают большое распространение (они экономичны в производстве и компактны).

Типичные значения ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ в области СВЧ составляют [9] соответственно $2,5 \pm 0,01$ и $0,0005$ для высокотемпературной и вы-

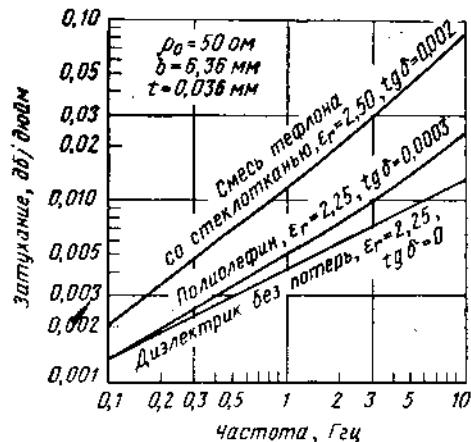


Рис. 5.16. Затухание в полосковой линии с волновым сопротивлением 50Ω , изготовленной методом фотогравировки:

сокопрочной модификации полистирола и $2,25 \pm 0,01$ и $0,0003$ для полиолефина. Уменьшение $\operatorname{tg} \delta$ приводит к уменьшению затухания в линии (см. расчетные кривые [9] рис. 5.16). Затухание в несимметричной полосковой линии может быть определено по формуле (5.29); потерями на излучение можно пренебречь, если отношение b/t невелико.

Собственная добротность (см. § 4.7) Q_0 полосковой линии, заполненной диэлектриком [1, 8], определяется по формуле

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_R} + \frac{1}{Q_G}, \quad (5.32)$$

где Q_R зависит только от потерь в проводниках; Q_G — от потерь в диэлектрике.

Q_R связано с α_R соотношением

$$Q_R = \frac{\beta}{2\alpha_R}, \quad (5.33)$$

где β — фазовая постоянная,

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (5.34)$$

λ — длина волны в диэлектрике,

$$\lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (5.35)$$

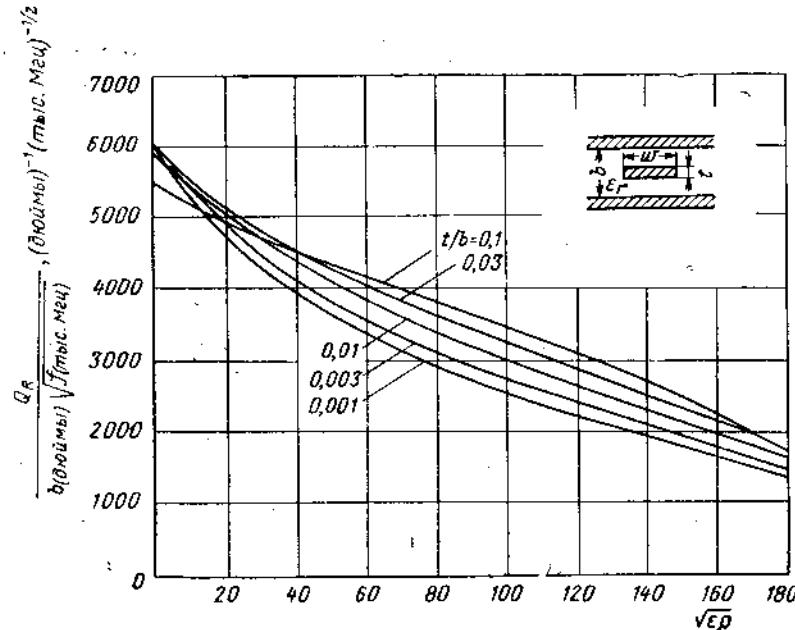


Рис. 5.17. Теоретические кривые Q_R для медной симметричной полосковой линии.

Q_R , определяемое по формуле (5.33), совпадает с собственной добротностью уединенного полуволнового резонатора, выполненного на данном типе полосковой линии [см. (4.45)].

Теоретические кривые Q_R для медной симметричной полосковой линии приведены на рис. 5.17.

Q_G определяется по формуле

$$Q_G = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}. \quad (5.36)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь среды, заполняющей линию.

Общая формула для определения собственной добротности Q_0 полосковой линии с диэлектрическим заполнением имеет вид

$$Q_0 = \frac{Q_R}{1 + Q_R \operatorname{tg} \delta}. \quad (5.37)$$

На рис. 5.18 даны графики для типовых значений Q_0 и α_R полосковой линии, коаксиальной линии и волновода.

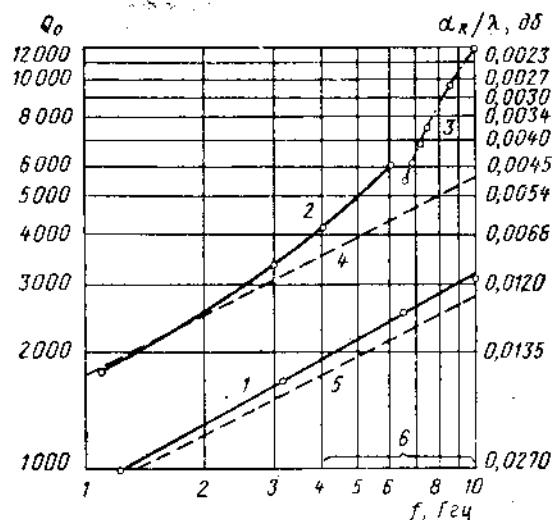


Рис. 5.18. Типовые значения собственной добротности (Q_0) и затухания (α_R) полосковой линии с посеребренными пластинами, коаксиальной воздушной линии и волновода:

1 — симметричная полосковая линия с характеристическим сопротивлением 50 Ω и расстоянием между заземленными пластинами 6,35 мм (опытная кривая); 2 — симметричная полосковая линия с характеристическим сопротивлением 50 Ω и расстоянием между заземленными пластинами 12,7 мм (опытная кривая); 3 — волновод 12x27,9 мм на 6,5—10,0 Гц (расчетная кривая); 4 — 1/2 дюймовая (12,7 мм) коаксиальная линия с характеристическим сопротивлением 77 Ω (расчетная кривая); 5 — 1/4 дюймовая (6,35 мм) коаксиальная линия с характеристическим сопротивлением 77 Ω (расчетная кривая); 6 — все проводники серебряные.

5.5. ПРЕДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Мощность, при которой начинается высокочастотный пробой, называется предельной или разрядной (или пробивной) [14]. Разрядная мощность симметричной полосковой линии с воздушным заполнением без диэлектрических опор приближенно подсчитывается по формуле [2, 6, 14]

$$P = \left[\frac{bf}{2} - \left(\frac{t}{2} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{d}{t} \right)^2 \frac{E_{\text{пред}}^2}{4.5r\rho}, \quad (5.38)$$

где ρ — волновое сопротивление передающей линии;

$$E_{\text{пред}} \approx 2.9 \frac{\text{kV}}{\text{мм}};$$

t — толщина центрального проводника;

b — расстояние между внешними пластинами;

d — минимальное расстояние между параллельными пластинами, при котором поле вызывает пробой;

d зависит от длины волны, давления и ширины импульса.

Формула (5.38) выведена при следующих допущениях: 1) края центрального проводника полукруглые; 2) разрядный градиент имеется не только на поверхности проводника, но распространяется на некоторое минимальное расстояние d ; 3) центральный проводник имеет полубесконечную ширину между бесконечными параллельными плоскостями; 4) центральный проводник изолирован; 5) пробой происходит на углу; 6) поле вблизи закругленного угла радиально. Принятые допущения приводят к тому, что расчет по формуле (5.38) дает заниженную оценку разрядной мощности полосковой линии. Так как в большинстве полосковых линий выполняется условие $b \gg d$, то

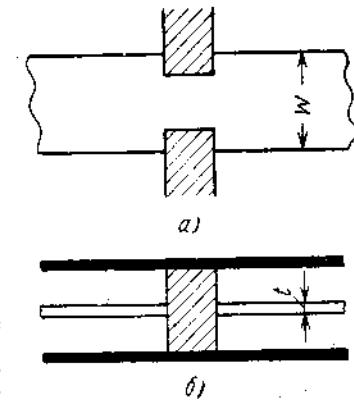
$$P \approx \frac{tbE_{\text{пред}}^2}{9\rho}. \quad (5.39)$$

Если центральный проводник укреплен на опорах (рис. 5.19) с диэлектрической постоянной ϵ_r (при условии $\rho < 150 \Omega$), тогда

$$P \approx \frac{tbE_{\text{пред}}^2}{9\epsilon_r^2 \rho}. \quad (5.40)$$

5.6. СВЯЗАННЫЕ ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ

Связанные полосковые линии используются при разработке направленных ответвителей, фильтров, направленных фильтров и др. (рис. 5.20).



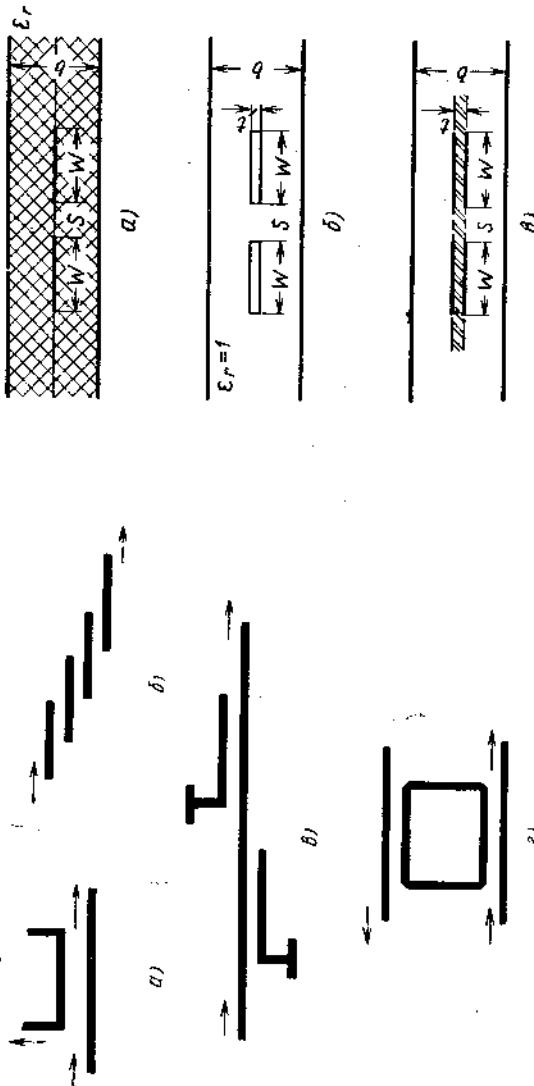


Рис. 5.20. Некоторые применения связанных полосковых линий (схематичное изображение центральных проводников):
а — направляемый ответвитель; б — полосовой фильтр;

а — направляемый ответвитель; б — заграждающий фильтр; в — управляемый фильтр.

Рис. 5.21. Поперечные сечения связанных полосковых линий:
а — печатные проводники между диэлектрическими пластинами; б — проводники конечной толщины; в — печатные проводники, нанесенные на обеих сторонах опорного диэлектрического листа.

Конструктивно связанные полосковые линии выполняются в виде:

1) печатных проводников, помещенных между диэлектрическими пластинами, внешние стороны которых покрыты проводящим слоем (рис. 5.21, а).

2) проводников конечной толщины, помещенных на равном расстоянии от оснований (рис. 5.21, б). Проводники могут быть укреплены с помощью диэлектрических опор или металлических опор, помещаемых в точках нулевого напряжения,

3) печатных проводников, наносимых на обе стороны опорного диэлектрического листа, расположенного симметрично в воздушном промежутке между основаниями (рис. 5.21, в).

К связанным полосковым линиям применима концепция связанных волн [15] либо нормальных волн [16] (см. также гл. 2). Ниже будут даны параметры, соответствующие нормальным волнам (ρ_{++} и ρ_{+-}). Связь между параметрами нормальных волн (ρ_{++} и ρ_{+-}) и связанных волн (γ и β) см. в гл. 2.

Распределение поля для нормальных волн четного и нечетного видов в связанный полосковой линии показано на рис. 2.9 и 2.10. Емкость каждого проводника относительно основания в случае четного типа волн меньше, а в случае нечетного типа волн больше емкости одиночного проводника той же ширины.

Волновое сопротивление для волн четного типа (ρ_{++}) будет больше волнового сопротивления для волн нечетного типа (ρ_{+-}), т. е.

$$\rho_{++} > \rho > \rho_{+-}, \quad (5.41)$$

где ρ — волновое сопротивление одиночной линии.

Ниже даны расчетные формулы ρ_{++} и ρ_{+-} для различных частных случаев.

СВЯЗАННЫЕ ПОЛОСКИ НУЛЕВОЙ ТОЛЩИНЫ

Волновое сопротивление связанных полосок нулевой толщины (рис. 5.21, а) (при допущении, что полоски достаточно широкие) для волн четного и нечетного вида определяется по формулам [2, 16]

$$\rho_{++}\left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b}\right) = \frac{30\pi}{V_{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b} - \frac{1}{2\epsilon_a} \left\{ C_f(0) + C_{fe} \left(0, \frac{s}{b} \right) \right\} \right]}, \text{ ом}; \quad (5.42)$$

$$\rho_{+-}\left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b}\right) = \frac{30\pi}{V_{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b} + \frac{1}{2\epsilon_a} \left\{ C_f(0) + C_{fo} \left(0, \frac{s}{b} \right) \right\} \right]}, \text{ ом}, \quad (5.43)$$

где $\epsilon_a = 0,0885\epsilon_r, \frac{n\phi}{cm}$;

$C_f(0)$ — краевая емкость $\left(\frac{n\phi}{cm}\right)$ одного ребра одиночной полоски нулевой толщины;

$$\frac{C_f(0)}{\epsilon_a} = \frac{2}{\pi} \ln 2; \quad (5.44)$$

$C_{fe}\left(0, \frac{s}{b}\right)$ — краевая емкость ($n\phi/cm$) соседних ребер двух полосок для волн четного типа

$$\frac{C_{fe}\left(0, \frac{s}{b}\right)}{\epsilon_a} = \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \operatorname{th} \frac{\pi s}{2b} \right) = \frac{s}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\operatorname{ch} \frac{\pi s}{2b} \right); \quad (5.45)$$

$C_{f0}\left(0, \frac{s}{b}\right)$ — краевая емкость ($n\phi/cm$) соседних ребер двух полосок для волн нечетного типа

$$\frac{C_{f0}\left(0, \frac{s}{b}\right)}{\epsilon_a} = \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \operatorname{cth} \frac{\pi s}{2b} \right) = \frac{s}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\operatorname{sh} \frac{\pi s}{2b} \right). \quad (5.46)$$

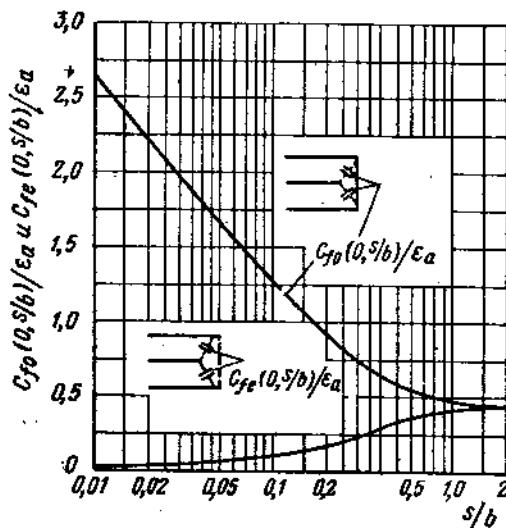


Рис. 5.22. График краевых емкостей связанных полосок нулевой толщины.

График краевых емкостей связанных полосок нулевой толщины для волн четного и нечетного типов представлен на рис. 5.22.

Из графика видно, что при $\frac{s}{b} > 2$ имеет место равенство

$$C_{f0}\left(0, \frac{s}{b}\right) \approx C_{fe}\left(0, \frac{s}{b}\right) \approx C_f(0). \quad (5.47)$$

График зависимости ρ_{++} и ρ_{+-} для полосок нулевой толщины показан на рис. 5.23.

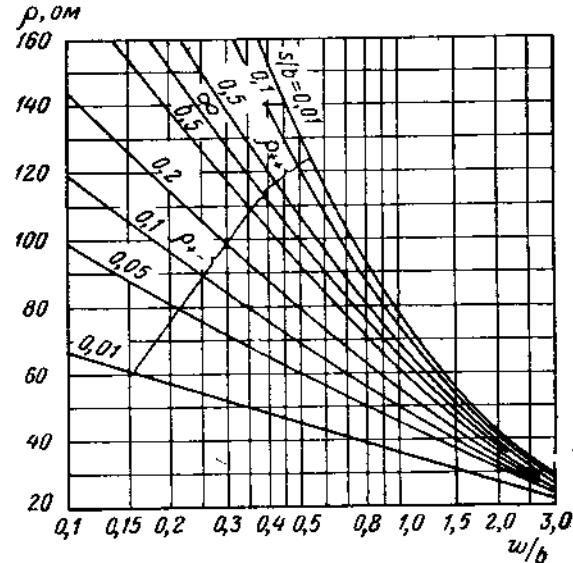


Рис. 5.23. График зависимости ρ_{++} и ρ_{+-} от w/b и s/b для связанных полосок нулевой толщины.

СВЯЗАННЫЕ ПОЛОСКИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Приближенные формулы для волнового сопротивления связанных полосок конечной толщины имеют вид [2, 16]:

$$\begin{aligned} \rho_{-+} & \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}, \frac{s}{b} \right) = \left\{ \frac{1}{\rho \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b} \right)} - \frac{C_f}{C_f(0)} \times \right. \\ & \times \left. \left[\frac{1}{\rho \left(\frac{w}{b}, 0 \right)} - \frac{1}{\rho_{++} \left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b} \right)} \right] \right\}^{-1}, \text{ ом}; \end{aligned} \quad (5.48)$$

при $\frac{s}{t} \leq 5$

$$\rho_{+-} \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}, \frac{s}{b} \right) = \left\{ \frac{1}{\rho_{+-} \left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b} \right)} + \right.$$

$$+ \left[\frac{1}{\rho \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b} \right)} - \frac{1}{\rho \left(\frac{w}{b}, 0 \right)} \right]^{-1} \\ - \frac{2}{377} \left[\frac{C_f}{\varepsilon_a} - \frac{C_f(0)}{\varepsilon_a} \right] + \frac{2t}{377s} \right]^{-1}, \text{ о.м.} \quad (5.49)$$

при $\frac{s}{t} > 5$

$$\rho_{+-} \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b}, \frac{s}{b} \right) = \left\{ \frac{1}{\rho \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b} \right)} + \frac{C_f}{C_f(0)} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{1}{\rho_{+-} \left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b} \right)} - \frac{1}{\rho \left(\frac{w}{b}, 0 \right)} \right] \right\}^{-1}, \text{ о.м.} \quad (5.50)$$

где $\rho \left(\frac{w}{b}, 0 \right)$ — волновое сопротивление одиночной полоски нулевой толщины [см. формулу (5.14)];

$\rho \left(\frac{w}{b}, \frac{t}{b} \right)$ — волновое сопротивление одиночной полоски конечной толщины [можно определить по формуле (5.13) или графикам рис. 5.7];

$\rho_{++} \left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b} \right)$ и $\rho_{+-} \left(\frac{w}{b}, 0, \frac{s}{b} \right)$ — волновые сопротивления связанных полосок нулевой толщины для волн четного и нечетного типов [см. (5.42) и (5.43)];

C_f — краевая емкость одиночной полоски конечной толщины [можно определить по формуле (5.12) или графику рис. 5.6].

Результаты расчета по формулам (5.48)–(5.50) для ρ_{++} и ρ_{+-} при $\frac{t}{b} = 0.1; 0.2; 0.3$ приведены в табл. 5.1–5.3 ($\varepsilon_r = 1$).

СВЯЗАННЫЕ ПОЛОСКИ С ИДЕАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТЬЮ

Условием идеальной направленности (см. гл. 2) связанных полосковых линий является

$$\rho_{++} \rho_{+-} = \rho_0^2 \quad (5.51)$$

или

$$I \cdot v = \rho_0^2, \quad (5.52)$$

где ρ_0 — волновое сопротивление подводящих линий (обычно или 75 ом).

Таблица 5.1

w/b	ρ_{++}										$t/b = 0.1$
	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
0,2	164,6	151,2	141,8	135,2	130,3	126,8	124,3	122,5	121,1	120,2	117,6
0,3	137,8	128,3	121,5	116,6	113,0	110,4	108,4	107,0	106,0	105,2	103,3
0,4	118,6	111,5	106,3	101,5	99,7	97,6	96,1	95,0	94,2	93,6	92,1
0,5	104,0	98,5	94,5	91,4	89,2	87,6	86,4	85,5	84,8	84,3	83,1
0,6	92,6	88,3	85,0	82,5	80,7	79,4	78,4	77,6	77,1	76,7	75,6
0,7	83,5	80,0	77,2	75,2	73,7	72,6	71,7	71,1	70,7	70,3	69,5
0,8	79,5	76,0	73,1	70,8	69,1	67,8	66,2	65,6	65,2	65,0	64,2
0,9	72,7	69,8	67,3	65,4	63,9	62,8	62,0	61,4	60,9	60,6	59,7
1,0	67,0	64,5	62,3	59,4	56,7	55,8	57,8	56,8	56,5	56,3	55,8
1,1	62,1	59,9	56,5	55,7	54,1	53,6	53,2	53,0	52,8	52,3	52,3
1,2	57,8	56,0	54,3	53,1	52,1	51,4	50,8	50,4	50,1	49,9	49,3
1,3	54,1	52,5	51,1	50,0	49,1	48,4	48,0	47,6	47,3	47,1	46,6
1,4	50,9	49,4	48,2	47,1	46,4	45,8	45,4	45,1	44,8	44,6	44,2
1,5	48,0	46,7	45,6	44,7	44,0	43,5	43,1	42,8	42,6	42,4	42,0
1,6	45,4	44,3	43,2	42,4	41,8	41,4	41,0	40,7	40,5	40,4	40,0
1,7	43,1	42,1	41,1	40,4	39,9	39,4	39,1	38,9	38,7	38,6	38,2
1,8	41,0	40,1	39,2	38,6	38,1	37,7	37,4	37,2	37,0	36,9	36,5
1,9	39,1	38,3	37,5	36,4	36,1	35,8	35,6	35,4	35,3	35,2	35,0
2,0	37,4	36,6	35,9	34,9	34,6	34,9	34,1	34,0	33,9	33,8	33,6

Результаты расчета по формулам (5.48)–(5.50)

Продолжение табл. 5.1

s/b	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	$\frac{t}{b} = 0,1$
w/b													
0,2	57,1	76,9	89,2	97,7	104,0	108,2	110,7	112,5	113,9	114,9	117,4		
0,3	53,5	70,5	80,7	87,6	93,2	96,0	97,9	99,4	100,4	101,2	103,1		
0,4	50,3	65,7	73,7	79,4	84,0	86,2	87,8	88,9	89,8	90,4	91,9		
0,5	47,5	60,4	67,8	72,9	76,4	78,3	79,6	80,5	81,2	81,9	83,0		
0,6	45,0	56,4	62,8	66,9	70,1	71,6	72,7	73,5	74,1	74,5	75,6		
0,7	42,7	52,9	58,5	62,0	64,8	66,1	67,0	67,7	68,1	68,5	69,4		
0,8	40,7	49,8	54,7	57,8	60,2	61,3	62,1	62,7	63,1	63,4	64,1		
0,9	38,8	47,0	51,4	54,1	56,2	57,2	58,4	58,7	59,0	59,6			
1,0	37,1	44,6	48,4	50,8	52,7	53,6	54,2	54,6	54,9	55,7			
1,1	35,6	42,3	45,8	48,0	49,6	50,4	50,9	51,3	51,6	51,8	52,3		
1,2	34,1	40,3	43,5	45,4	46,9	47,6	48,0	48,4	48,6	48,8	49,2		
1,3	32,8	38,5	41,4	43,1	44,4	45,0	45,4	45,8	46,0	46,1	46,5		
1,4	31,6	36,8	39,4	41,0	42,2	42,8	43,1	43,4	43,6	43,8	44,1		
1,5	30,4	35,3	37,7	39,1	40,2	40,7	41,0	41,3	41,5	41,6	41,9		
1,6	29,4	33,9	36,1	37,4	38,4	38,8	39,2	39,4	39,5	39,7	40,0		
1,7	28,4	32,6	34,6	35,8	36,7	37,1	37,4	37,6	37,8	37,9	38,2		
1,8	27,5	31,4	33,2	34,4	35,2	35,6	35,8	36,0	36,2	36,3	36,5		
1,9	26,6	30,3	32,0	33,0	33,8	34,1	34,4	34,6	34,7	34,8	35,0		
2,0	25,8	29,2	30,8	31,8	32,5	32,8	33,0	33,2	33,3	33,4	33,6		

Таблица 5.2

s/b	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	$\frac{t}{b} = 0,2$
w/b													
0,2	141,1	129,4	121,3	115,5	111,3	108,2	106,0	104,4	103,3	102,4	100,2		
0,3	118,9	110,5	104,5	100,1	97,0	94,7	93,0	91,3	90,8	90,2	88,5		
0,4	102,7	96,4	91,8	88,4	85,9	84,1	82,8	81,8	81,1	80,6	79,2		
0,5	90,4	85,4	81,8	79,1	77,1	75,7	74,6	73,8	73,2	72,8	71,7		
0,6	85,4	80,7	76,8	73,8	71,6	70,0	68,8	67,9	67,2	66,7	66,4		
0,7	76,7	72,9	69,7	67,2	65,4	64,0	63,0	62,3	61,7	61,3	61,0		
0,8	69,6	63,8	61,7	59,0	57,5	54,7	52,0	50,4	53,4	52,7	51,9		
0,9	63,8	61,1	58,8	55,7	53,0	51,9	51,0	50,4	49,9	49,3	49,1		
1,0	58,8	56,5	54,5	52,0	49,6	48,5	47,8	47,2	46,8	46,5	46,2		
1,1	54,5	52,6	50,9	47,6	46,5	45,6	44,9	44,4	44,1	43,8	43,6		
1,2	50,8	49,1	47,6	44,8	43,8	43,0	42,4	42,0	41,6	41,4	40,7		
1,3	47,6	46,1	44,8	42,3	41,4	40,7	40,2	39,8	39,4	39,2	38,6		
1,4	44,8	43,5	41,1	40,0	39,2	38,6	38,1	37,8	37,5	37,3	36,7		
1,5	42,3	41,1	40,0	39,0	38,0	37,3	36,8	36,3	35,7	35,5	35,0		
1,6	40,0	39,0	38,0	37,3	36,5	35,0	34,6	34,3	34,1	33,9	33,5		
1,7	38,0	37,1	36,2	35,5	35,0	34,6	33,9	33,5	33,1	32,8	32,3		
1,8	36,2	35,3	34,5	33,9	33,5	33,1	32,8	32,6	32,5	32,3	32,0		
1,9	34,5	33,7	33,0	32,5	32,0	31,7	31,5	31,3	31,1	31,0	30,7		
2,0	33,0	32,3	31,6	31,1	30,7	30,2	30,0	29,7	29,5	29,3	29,1		

Результаты расчета по формулам (5.48)–(5.50)

w/b	s/b	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	$\frac{t}{b} = 0,2$
0,2	42,2	7,9	60,4	72,1	80,4	86,4	91,0	94,6	97,0	98,6	99,3	101,1		
0,3	49,0	56,0	65,8	72,6	77,5	81,2	84,0	86,1	87,3	88,0	89,4			
0,4	52,1	60,5	66,2	70,3	73,3	75,6	77,1	78,0	78,5	79,7				
0,5	56,1	64,7	69,0	70,0	64,3	66,8	68,7	70,0	70,8	71,3	72,3			
0,6	52,2	56,3	59,3	61,4	64,1	64,1	64,1	64,1	65,7	65,7				
0,7	43,2	48,8	52,4	54,9	56,9	58,1	58,9	59,4	59,8	60,5				
0,8	40,8	45,8	49,0	51,2	52,8	54,0	54,7	55,2	55,4	56,1				
0,9	38,0	39,3	38,7	43,2	46,0	48,0	49,3	50,3	51,0	51,4	52,3			
1,0	36,1	39,1	36,8	40,8	43,4	45,1	46,3	47,2	47,7	48,0	48,9			
1,1	28,1	35,1	38,8	41,0	42,5	43,6	44,3	44,8	45,1	45,3	45,8			
1,2	27,0	33,8	36,9	38,9	40,3	41,2	41,8	42,3	42,6	42,8	43,2			
1,3	26,1	32,1	35,1	37,0	38,2	39,1	39,6	40,0	40,2	40,4	40,7			
1,4	25,2	30,8	33,6	35,2	36,4	37,2	37,7	38,0	38,3	38,4	38,7			
1,5	24,4	29,6	32,1	33,8	34,7	35,4	36,0	36,3	36,5	36,6	36,8			
1,6	23,7	28,5	30,8	32,2	33,2	33,8	34,3	34,6	34,8	35,0	35,2			
1,7	22,9	27,4	29,6	30,9	31,8	32,4	32,8	33,1	33,3	33,4	33,6			
1,8	22,3	26,5	28,5	29,7	29,5	29,7	30,5	31,0	31,6	31,8	32,0			
1,9	21,6	25,6	27,5	28,6	29,3	29,8	30,2	30,5	30,7	30,8	30,8			
2,0	21,0	24,7	26,5	27,5	28,2	28,7	29,0	29,2	29,4	29,5	29,6			

Таблица 5.3

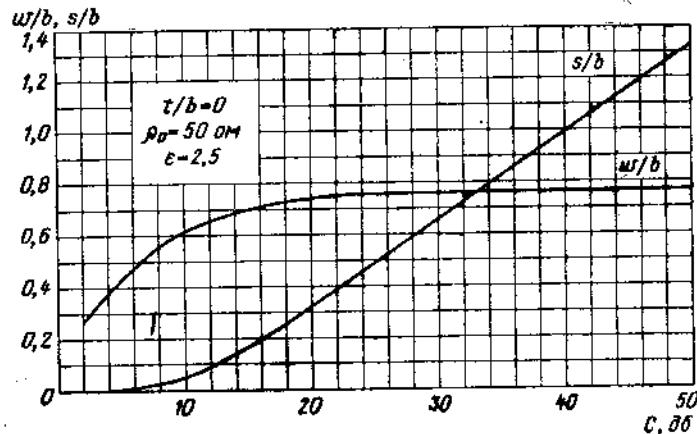
w/b	s/b	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	$\frac{t}{b} = 0,3$
0,2	122,4	135,5	112,2	105,1	100,0	96,4	93,7	91,8	90,4	89,4	88,7	86,8		
0,3	12,4	103,2	95,9	90,6	86,8	84,1	82,1	80,6	79,5	78,7	78,2	76,7		
0,4	96,0	89,2	83,7	79,7	76,7	74,6	73,0	71,8	70,9	70,3	69,9	68,7		
0,5	83,8	78,6	74,3	71,1	68,7	67,0	65,7	64,8	64,1	63,6	63,2	62,2		
0,6	74,4	70,2	66,8	64,2	62,2	60,8	59,8	59,0	58,4	58,0	57,7	56,8		
0,7	66,8	63,5	60,6	58,5	56,9	55,7	54,8	54,1	53,6	53,3	53,0	52,3		
0,8	60,7	57,9	55,5	53,7	52,4	51,4	50,6	50,0	49,6	49,3	49,1	48,5		
0,9	55,6	53,2	51,1	49,7	48,5	47,6	47,0	46,5	46,2	45,9	45,7	45,2		
1,0	51,3	49,3	47,5	46,2	45,2	44,4	43,9	43,4	43,1	42,9	42,7	42,3		
1,1	47,6	45,8	44,4	43,2	42,3	41,6	41,1	40,8	40,5	40,3	40,1	39,7		
1,2	44,4	42,9	41,5	40,5	39,8	39,2	38,7	38,4	38,1	38,0	37,8	37,5		
1,3	41,6	40,2	39,1	38,2	37,5	37,0	36,6	36,3	36,1	35,9	35,8	35,5		
1,4	39,1	37,9	36,9	35,5	36,1	34,6	34,4	34,2	34,0	34,0	33,9	33,6		
1,5	36,9	35,9	34,9	33,2	33,7	33,2	32,9	32,7	32,5	32,4	32,3	32,0		
1,6	33,9	34,0	33,2	32,5	32,0	31,6	31,4	31,1	31,0	30,9	30,8	30,5		
1,7	31,6	32,4	31,6	31,0	30,5	30,2	29,9	29,7	29,6	29,5	29,4	29,2		
1,8	30,1	30,8	30,2	29,6	29,2	28,9	28,6	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0		
1,9	28,8	29,5	28,8	27,3	28,0	27,7	27,4	27,3	27,2	27,1	27,0	26,8		
2,0	27,1	28,2	27,6	26,8	27,2	26,3	26,2	26,1	26,0	25,9	25,9	25,8		

Продолжение табл. 5.3

w/b	s/b	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	$\frac{t}{b} = 0,3$
0,2	0,2	33,4	49,6	60,2	67,9	73,6	77,9	81,3	84,0	86,2	87,5	89,8	
0,3	5,5	31,8	46,1	55,2	61,5	66,2	69,7	72,4	74,5	76,2	77,4	79,5	
0,4	5,5	30,3	43,1	50,9	56,3	60,1	63,0	65,2	67,0	68,4	69,2	70,6	
0,5	5,4	29,0	40,5	47,3	51,9	55,1	57,5	59,4	60,8	61,9	62,6	63,8	
0,6	5,4	27,8	38,1	44,1	48,1	50,9	52,9	54,5	55,7	56,6	57,1	58,1	
0,7	5,3	26,6	36,0	41,4	44,8	47,2	49,0	50,3	51,4	52,1	52,6	53,6	
0,8	5,3	25,6	34,2	38,9	42,0	44,1	45,6	46,8	47,6	48,3	48,7	49,5	
0,9	5,2	24,6	32,5	36,8	39,4	41,3	42,6	43,6	44,4	45,0	45,4	46,1	
1,0	5,2	23,8	31,0	34,8	37,2	38,9	40,1	40,9	41,6	42,1	42,4	43,2	
1,1	5,1	22,1	28,6	33,1	35,2	36,7	37,8	38,6	39,2	39,6	39,9	40,5	
1,2	5,1	21,4	27,2	30,0	31,5	33,1	34,8	36,4	37,0	37,4	38,2	38,8	
1,3	5,1	20,8	26,1	28,7	30,4	31,5	32,2	32,8	33,2	33,6	33,8	34,3	
1,4	5,0	20,1	25,1	27,5	29,0	30,0	30,7	31,2	31,6	32,0	31,7	32,3	
1,5	5,0	19,5	24,2	26,4	27,8	28,7	29,4	29,8	30,2	30,5	30,6	31,3	
1,6	4,9	19,0	23,3	25,4	26,7	27,5	28,1	28,5	28,9	29,1	29,3	29,9	
1,7	4,9	18,4	22,5	24,5	25,6	26,4	27,0	27,4	27,7	28,1	28,4	28,6	
1,8	4,9	17,9	21,8	23,6	24,7	25,4	26,3	26,9	27,4	27,8	28,1	28,4	
1,9	4,9	17,5	21,1	22,8	23,8	24,5	25,3	25,8	26,3	26,8	27,4	27,9	
2,0	4,8												

Таблица 5.4
Зависимость w/b и s/b от переходного затухания C , дБ
полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0, \rho_0 = 50 \text{ ом}, \epsilon_r = 2,5$$



$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b
2,0	0,244	0,003	6,2	0,490	0,017	10,4	0,617	0,054
2,2	0,262	0,004	6,4	0,494	0,018	10,6	0,622	0,058
2,4	0,280	0,005	6,6	0,498	0,019	10,8	0,626	0,062
2,6	0,294	0,005	6,8	0,506	0,020	11,0	0,630	0,065
2,8	0,308	0,006	7,0	0,514	0,020	11,2	0,635	0,069
3,0	0,322	0,006	7,2	0,523	0,021	11,4	0,639	0,073
3,2	0,334	0,006	7,4	0,530	0,022	11,6	0,644	0,078
3,4	0,348	0,007	7,6	0,537	0,024	11,8	0,648	0,082
3,6	0,360	0,007	7,8	0,544	0,025	12,0	0,653	0,086
3,8	0,371	0,007	8,0	0,551	0,027	12,2	0,657	0,091
4,0	0,383	0,008	8,2	0,556	0,028	12,4	0,661	0,096
4,2	0,394	0,009	8,4	0,565	0,030	12,6	0,665	0,100
4,4	0,404	0,010	8,6	0,571	0,032	12,8	0,668	0,106
4,6	0,414	0,010	8,8	0,577	0,034	13,0	0,673	0,111
4,8	0,425	0,011	9,0	0,583	0,035	13,2	0,676	0,116
5,0	0,434	0,012	9,2	0,588	0,037	13,4	0,680	0,121
5,2	0,444	0,013	9,4	0,593	0,039	13,6	0,684	0,127
5,4	0,454	0,014	9,6	0,599	0,042	13,8	0,686	0,133
5,6	0,461	0,014	9,8	0,604	0,045	14,0	0,690	0,138
5,8	0,471	0,015	10,0	0,609	0,047	14,2	0,693	0,144
6,0	0,480	0,016	10,2	0,613	0,051	14,4	0,695	0,149

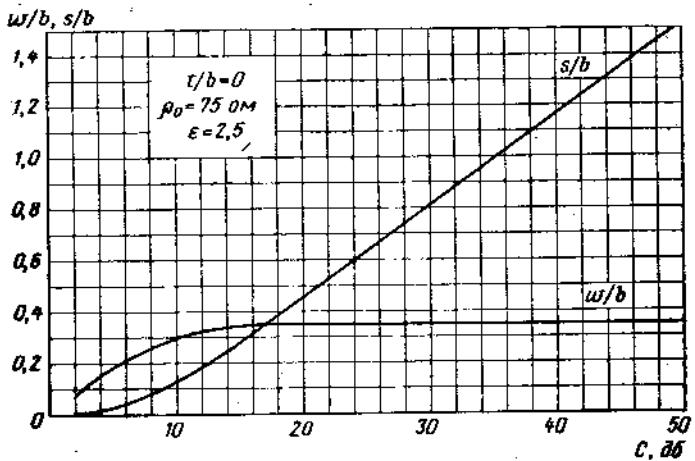
Таблица 5.5

Продолжение табл. 5.4

$C, \text{дб}$	w/b	s/b	$C, \text{дб}$	w/b	s/b	$C, \text{дб}$	w/b	s/b
14,6	0,698	0,156	23,2	0,743	0,430	31,8	0,750	0,734
14,8	0,700	0,161	23,4	0,744	0,438	32,0	0,750	0,741
15,0	0,703	0,167	23,6	0,744	0,445	32,2	0,751	0,749
15,2	0,706	0,173	23,8	0,744	0,452	32,4	0,751	0,758
15,4	0,708	0,179	24,0	0,744	0,460	32,6	0,751	0,764
15,6	0,710	0,185	24,2	0,745	0,466	32,8	0,751	0,772
15,8	0,712	0,191	24,4	0,745	0,473	33,0	0,751	0,779
16,0	0,714	0,197	24,6	0,745	0,480	33,2	0,751	0,786
16,2	0,716	0,203	24,8	0,746	0,487	33,4	0,751	0,794
16,4	0,718	0,210	25,0	0,746	0,493	33,6	0,751	0,800
16,6	0,719	0,216	25,2	0,746	0,501	33,8	0,751	0,807
16,8	0,720	0,221	25,4	0,746	0,508	34,0	0,751	0,814
17,0	0,721	0,228	25,6	0,747	0,516	34,2	0,751	0,821
17,2	0,722	0,234	25,8	0,747	0,522	34,4	0,751	0,828
17,4	0,723	0,240	26,0	0,747	0,529	34,6	0,751	0,835
17,6	0,725	0,246	26,2	0,748	0,536	34,8	0,752	0,841
17,8	0,726	0,253	26,4	0,748	0,543	35,0	0,752	0,847
18,0	0,727	0,259	26,6	0,748	0,550	35,2	0,752	0,854
18,2	0,728	0,265	26,8	0,748	0,558	35,4	0,752	0,860
18,4	0,729	0,271	27,0	0,748	0,564	35,6	0,752	0,866
18,6	0,730	0,277	27,2	0,748	0,570	35,8	0,752	0,872
18,8	0,731	0,283	27,4	0,748	0,579	36,0	0,752	0,879
19,0	0,732	0,290	27,6	0,748	0,585	36,2	0,752	0,885
19,2	0,733	0,296	27,8	0,749	0,592	36,4	0,752	0,891
19,4	0,734	0,304	28,0	0,749	0,599	36,6	0,752	0,898
19,6	0,734	0,310	28,2	0,749	0,605	36,8	0,752	0,905
19,8	0,735	0,316	28,4	0,750	0,612	37,0	0,752	0,910
20,0	0,735	0,322	28,6	0,750	0,620	37,2	0,753	0,916
20,2	0,736	0,328	28,8	0,750	0,627	37,4	0,753	0,920
20,4	0,737	0,336	29,0	0,750	0,634	37,6	0,753	0,928
20,6	0,737	0,342	29,2	0,750	0,641	37,8	0,753	0,934
20,8	0,738	0,348	29,4	0,750	0,648	38,0	0,753	0,941
21,0	0,738	0,354	29,6	0,750	0,655	38,2	0,753	0,947
21,2	0,739	0,361	29,8	0,750	0,662	38,4	0,753	0,953
21,4	0,739	0,368	30,0	0,750	0,669	38,6	0,753	0,959
21,6	0,740	0,375	30,2	0,750	0,676	38,8	0,753	0,966
21,8	0,740	0,381	30,4	0,750	0,684	39,0	0,753	0,971
22,0	0,741	0,388	30,6	0,750	0,691	39,2	0,753	0,976
22,2	0,741	0,394	30,8	0,750	0,699	39,4	0,753	0,984
22,4	0,741	0,402	31,0	0,750	0,705	39,6	0,753	0,989
22,6	0,742	0,410	31,2	0,750	0,712	39,8	0,753	0,994
22,8	0,742	0,417	31,4	0,750	0,719	40,0	0,753	1,000
23,0	0,743	0,423	31,6	0,750	0,727			

Зависимость w/b и s/b от переходного затухания $C, \text{дб}$ полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0; \rho_0 = 75 \Omega; \epsilon_r = 2,5$$



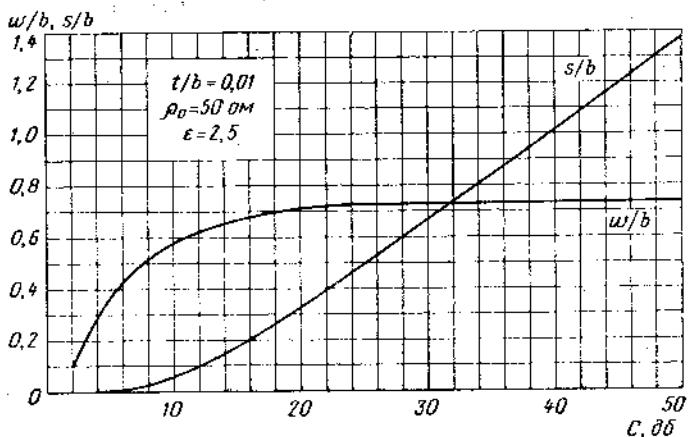
$C, \text{дб}$	w/b	s/b	$C, \text{дб}$	w/b	s/b	$C, \text{дб}$	w/b	s/b
2,0	0,084	0,012	6,2	0,226	0,045	10,4	0,314	0,130
2,2	0,092	0,013	6,4	0,231	0,047	10,6	0,316	0,137
2,4	0,100	0,014	6,6	0,237	0,049	10,8	0,319	0,144
2,6	0,106	0,015	6,8	0,242	0,051	11,0	0,321	0,151
2,8	0,113	0,017	7,0	0,247	0,054	11,2	0,324	0,158
3,0	0,121	0,018	7,2	0,252	0,056	11,4	0,326	0,165
3,2	0,128	0,020	7,4	0,258	0,058	11,6	0,328	0,171
3,4	0,135	0,021	7,6	0,262	0,061	11,8	0,330	0,179
3,6	0,142	0,022	7,8	0,266	0,065	12,0	0,331	0,186
3,8	0,148	0,023	8,0	0,270	0,068	12,2	0,332	0,192
4,0	0,156	0,025	8,2	0,274	0,072	12,4	0,334	0,199
4,2	0,164	0,026	8,4	0,279	0,076	12,6	0,336	0,206
4,4	0,170	0,028	8,6	0,284	0,080	12,8	0,337	0,214
4,6	0,177	0,030	8,8	0,287	0,084	13,0	0,338	0,220
4,8	0,184	0,032	9,0	0,291	0,090	13,2	0,339	0,228
5,0	0,190	0,034	9,2	0,294	0,095	13,4	0,340	0,236
5,2	0,196	0,035	9,4	0,298	0,100	13,6	0,341	0,242
5,4	0,202	0,037	9,6	0,302	0,106	13,8	0,342	0,248
5,6	0,208	0,039	9,8	0,305	0,111	14,0	0,342	0,256
5,8	0,214	0,040	10,0	0,308	0,117	14,2	0,343	0,263
6,0	0,220	0,042	10,2	0,310	0,123	14,4	0,344	0,270

Продолжение табл. 5.5

<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
14,6	0,345	0,276	23,2	0,354	0,580	31,8	0,354	0,886
14,8	0,345	0,284	23,4	0,354	0,589	32,0	0,354	0,894
15,0	0,346	0,290	23,6	0,354	0,595	32,2	0,354	0,900
15,2	0,346	0,297	23,8	0,354	0,600	32,4	0,354	0,909
15,4	0,347	0,304	24,0	0,354	0,609	32,6	0,354	0,916
15,6	0,347	0,312	24,2	0,354	0,616	32,8	0,354	0,923
15,8	0,348	0,318	24,4	0,354	0,624	33,0	0,354	0,930
16,0	0,349	0,326	24,6	0,354	0,630	33,2	0,354	0,937
16,2	0,349	0,333	24,8	0,354	0,634	33,4	0,354	0,944
16,4	0,350	0,342	25,0	0,354	0,645	33,6	0,354	0,951
16,6	0,350	0,349	25,2	0,354	0,653	33,8	0,354	0,959
16,8	0,350	0,354	25,4	0,354	0,660	34,0	0,354	0,966
17,0	0,351	0,362	25,6	0,354	0,666	34,2	0,354	0,973
17,2	0,351	0,370	25,8	0,354	0,674	34,4	0,354	0,980
17,4	0,351	0,376	26,0	0,354	0,682	34,6	0,354	0,988
17,6	0,352	0,384	26,2	0,354	0,684	34,8	0,354	0,995
17,8	0,352	0,390	26,4	0,354	0,697	35,0	0,354	1,000
18,0	0,352	0,398	26,6	0,354	0,704	35,2	0,354	1,008
18,2	0,352	0,404	26,8	0,354	0,710	35,4	0,354	1,016
18,4	0,352	0,410	27,0	0,354	0,717	35,6	0,354	1,024
18,6	0,352	0,418	27,2	0,354	0,723	35,8	0,354	1,030
18,8	0,352	0,424	27,4	0,354	0,729	36,0	0,354	1,038
19,0	0,353	0,433	27,6	0,354	0,737	36,2	0,354	1,045
19,2	0,353	0,440	27,8	0,354	0,744	36,4	0,354	1,053
19,4	0,353	0,448	28,0	0,354	0,751	36,6	0,354	1,060
19,6	0,353	0,454	28,2	0,354	0,759	36,8	0,354	1,068
19,8	0,353	0,460	28,4	0,354	0,766	37,0	0,354	1,074
20,0	0,353	0,468	28,6	0,354	0,773	37,2	0,354	1,080
20,2	0,354	0,475	28,8	0,354	0,780	37,4	0,354	1,090
20,4	0,354	0,482	29,0	0,354	0,787	37,6	0,354	1,097
20,6	0,354	0,489	29,2	0,354	0,794	37,8	0,354	1,103
20,8	0,354	0,496	29,4	0,354	0,800	38,0	0,354	1,111
21,0	0,354	0,503	29,6	0,354	0,807	38,2	0,354	1,118
21,2	0,354	0,510	29,8	0,354	0,814	38,4	0,354	1,125
21,4	0,354	0,518	30,0	0,354	0,822	38,6	0,354	1,132
21,6	0,354	0,524	30,2	0,354	0,828	38,8	0,354	1,140
21,8	0,354	0,531	30,4	0,354	0,836	39,0	0,354	1,148
22,0	0,354	0,539	30,6	0,354	0,844	39,2	0,354	1,155
22,2	0,354	0,548	30,8	0,354	0,850	39,4	0,354	1,162
22,4	0,354	0,553	31,0	0,354	0,858	39,6	0,354	1,172
22,6	0,354	0,560	31,2	0,354	0,864	39,8	0,354	1,179
22,8	0,354	0,568	31,4	0,354	0,871	40,0	0,354	1,190
23,0	0,354	0,574	31,6	0,354	0,880			

Таблица 5.6
Зависимость w/b и s/b от переходного затухания C , дБ
полоскового направленного ответвления

$$\frac{t}{b} = 0,01, \rho_0 = 50 \text{ ом}, \varepsilon_r = 2,5$$

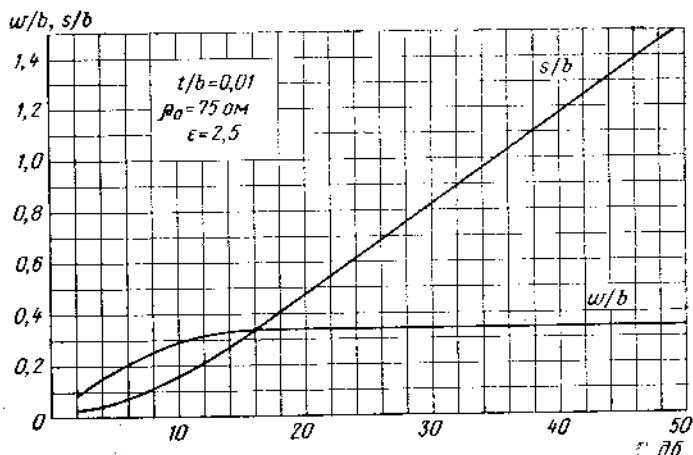


<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
2,0	0,210	0,004	6,2	0,454	0,017	10,4	0,598	0,067
2,2	0,228	0,004	6,4	0,463	0,019	10,6	0,602	0,071
2,4	0,244	0,004	6,6	0,471	0,020	10,8	0,606	0,074
2,6	0,260	0,005	6,8	0,480	0,021	11,0	0,611	0,078
2,8	0,273	0,005	7,0	0,488	0,023	11,2	0,616	0,083
3,0	0,286	0,006	7,2	0,497	0,024	11,4	0,620	0,087
3,2	0,300	0,006	7,4	0,504	0,025	11,6	0,624	0,091
3,4	0,312	0,007	7,6	0,514	0,027	11,8	0,628	0,096
3,6	0,325	0,007	7,8	0,520	0,029	12,0	0,632	0,100
3,8	0,336	0,008	8,0	0,527	0,031	12,2	0,636	0,104
4,0	0,342	0,008	8,2	0,534	0,033	12,4	0,640	0,110
4,2	0,359	0,009	8,4	0,541	0,035	12,6	0,642	0,114
4,4	0,370	0,010	8,6	0,548	0,037	12,8	0,646	0,120
4,6	0,380	0,011	8,8	0,554	0,040	13,0	0,650	0,125
4,8	0,390	0,011	9,0	0,560	0,043	13,2	0,654	0,130
5,0	0,400	0,012	9,2	0,566	0,046	13,4	0,657	0,136
5,2	0,410	0,013	9,4	0,572	0,050	13,6	0,661	0,141
5,4	0,419	0,014	9,6	0,577	0,053	13,8	0,664	0,148
5,6	0,428	0,014	9,8	0,583	0,056	14,0	0,667	0,153
5,8	0,436	0,015	10,0	0,588	0,060	14,2	0,670	0,158
6,0	0,445	0,016	10,2	0,594	0,063	14,4	0,673	0,164

Таблица 5.7

Зависимость w/b и s/b от переходного затухания C , дБ
полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,01, \rho_0 = 75 \text{ ом}, \varepsilon_r = 2,5$$



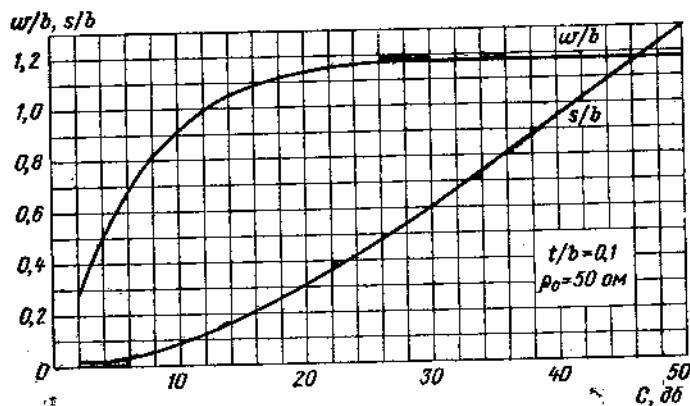
$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b
2,0	0,064	0,010	6,2	0,182	0,052	10,4	0,284	0,142
2,2	0,070	0,011	6,4	0,188	0,054	10,6	0,287	0,147
2,4	0,074	0,012	6,6	0,194	0,057	10,8	0,289	0,153
2,6	0,080	0,013	6,8	0,200	0,060	11,0	0,291	0,159
2,8	0,084	0,015	7,0	0,208	0,063	11,2	0,293	0,165
3,0	0,088	0,016	7,2	0,213	0,067	11,4	0,295	0,170
3,2	0,094	0,018	7,4	0,219	0,070	11,6	0,296	0,176
3,4	0,100	0,020	7,6	0,225	0,074	11,8	0,298	0,183
3,6	0,106	0,022	7,8	0,230	0,078	12,0	0,299	0,189
3,8	0,112	0,024	8,0	0,235	0,082	12,2	0,300	0,194
4,0	0,118	0,026	8,2	0,241	0,086	12,4	0,301	0,202
4,2	0,124	0,028	8,4	0,246	0,090	12,6	0,302	0,208
4,4	0,130	0,030	8,6	0,251	0,094	12,8	0,303	0,216
4,6	0,136	0,032	8,8	0,256	0,099	13,0	0,304	0,220
4,8	0,140	0,034	9,0	0,260	0,104	13,2	0,304	0,227
5,0	0,148	0,036	9,2	0,264	0,109	13,4	0,305	0,234
5,2	0,154	0,039	9,4	0,269	0,114	13,6	0,306	0,240
5,4	0,159	0,042	9,6	0,273	0,120	13,8	0,307	0,247
5,6	0,164	0,044	9,8	0,276	0,125	14,0	0,307	0,253
5,8	0,170	0,046	10,0	0,279	0,131	14,2	0,308	0,260
6,0	0,176	0,049	10,2	0,282	0,136	14,4	0,309	0,267

Продолжение табл. 5.7

<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
14,6	0,309	0,274	23,2	0,326	0,578	31,8	0,331	0,879
14,8	0,310	0,280	23,4	0,327	0,585	32,0	0,331	0,886
15,0	0,310	0,287	23,6	0,327	0,592	32,2	0,331	0,893
15,2	0,311	0,294	23,8	0,327	0,599	32,4	0,331	0,900
15,4	0,312	0,301	24,0	0,327	0,604	32,6	0,331	0,908
15,6	0,312	0,308	24,2	0,327	0,612	32,8	0,331	0,915
15,8	0,313	0,315	24,4	0,327	0,618	33,0	0,332	0,922
16,0	0,313	0,322	24,6	0,328	0,626	33,2	0,332	0,930
16,2	0,314	0,330	24,8	0,328	0,634	33,4	0,332	0,936
16,4	0,314	0,336	25,0	0,328	0,640	33,6	0,332	0,943
16,6	0,314	0,342	25,2	0,328	0,647	33,8	0,332	0,951
16,8	0,315	0,350	25,4	0,328	0,653	34,0	0,332	0,959
17,0	0,315	0,356	25,6	0,328	0,661	34,2	0,332	0,965
17,2	0,316	0,363	25,8	0,328	0,668	34,4	0,332	0,971
17,4	0,316	0,370	26,0	0,328	0,675	34,6	0,332	0,980
17,6	0,317	0,377	26,2	0,328	0,682	34,8	0,332	0,986
17,8	0,318	0,384	26,4	0,329	0,689	35,0	0,332	0,993
18,0	0,318	0,392	26,6	0,329	0,697	35,2	0,332	1,000
18,2	0,318	0,400	26,8	0,329	0,703	35,4	0,332	1,006
18,4	0,319	0,406	27,0	0,329	0,710	35,6	0,332	1,014
18,6	0,319	0,413	27,2	0,329	0,717	35,8	0,332	1,020
18,8	0,320	0,421	27,4	0,329	0,724	36,0	0,333	1,029
19,0	0,320	0,429	27,6	0,330	0,730	36,2	0,333	1,036
19,2	0,320	0,436	27,8	0,330	0,738	36,4	0,333	1,043
19,4	0,321	0,443	28,0	0,330	0,746	36,6	0,333	1,050
19,6	0,321	0,451	28,2	0,330	0,753	36,8	0,333	1,057
19,8	0,322	0,460	28,4	0,330	0,759	37,0	0,333	1,065
20,0	0,322	0,467	28,6	0,330	0,766	37,2	0,333	1,072
20,2	0,322	0,473	28,8	0,330	0,774	37,4	0,333	1,080
20,4	0,323	0,481	29,0	0,330	0,781	37,6	0,333	1,087
20,6	0,323	0,489	29,2	0,330	0,788	37,8	0,333	1,093
20,8	0,323	0,495	29,4	0,330	0,795	38,0	0,334	1,100
21,0	0,324	0,502	29,6	0,330	0,802	38,2	0,334	1,108
21,2	0,324	0,510	29,8	0,330	0,809	38,4	0,334	1,116
21,4	0,324	0,518	30,0	0,330	0,815	38,6	0,334	1,123
21,6	0,324	0,524	30,2	0,330	0,823	38,8	0,334	1,131
21,8	0,325	0,530	30,4	0,330	0,830	39,0	0,334	1,138
22,0	0,325	0,537	30,6	0,330	0,836	39,2	0,334	1,144
22,2	0,325	0,544	30,8	0,330	0,844	39,4	0,334	1,152
22,4	0,325	0,552	31,0	0,330	0,851	39,6	0,334	1,159
22,6	0,326	0,558	31,2	0,330	0,858	39,8	0,334	1,166
22,8	0,326	0,565	31,4	0,330	0,865	40,0	0,334	1,173
23,0	0,326	0,572	31,6	0,330	0,872			

Таблица 5.8
Зависимость w/b и s/b от переходного затухания $C, \text{дБ}$
полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,1, \rho_0 = 50 \Omega, \epsilon_r = 1$$



<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
2,0	0,275	0,011	6,6	0,730	0,043	11,2	0,962	0,103
2,2	0,304	0,012	6,8	0,742	0,044	11,4	0,968	0,106
2,4	0,340	0,013	7,0	0,756	0,047	11,6	0,977	0,110
2,6	0,360	0,014	7,2	0,770	0,048	11,8	0,984	0,114
2,8	0,392	0,015	7,4	0,781	0,050	12,0	0,990	0,117
3,0	0,418	0,017	7,6	0,794	0,052	12,2	0,995	0,120
3,2	0,440	0,018	7,8	0,804	0,054	12,4	1,001	0,124
3,4	0,460	0,019	8,0	0,816	0,056	12,6	1,007	0,128
3,6	0,480	0,020	8,2	0,827	0,059	12,8	1,012	0,132
3,8	0,500	0,022	8,4	0,838	0,062	13,0	1,018	0,136
4,0	0,520	0,023	8,6	0,848	0,064	13,2	1,024	0,139
4,2	0,541	0,024	8,8	0,858	0,066	13,4	1,028	0,142
4,4	0,561	0,026	9,0	0,867	0,069	13,6	1,032	0,148
4,6	0,580	0,027	9,2	0,876	0,072	13,8	1,038	0,151
4,8	0,598	0,028	9,4	0,886	0,075	14,0	1,044	0,156
5,0	0,616	0,030	9,6	0,896	0,078	14,2	1,048	0,160
5,2	0,632	0,031	9,8	0,905	0,080	14,4	1,052	0,164
5,4	0,647	0,033	10,0	0,914	0,084	14,6	1,057	0,169
5,6	0,662	0,034	10,2	0,924	0,086	14,8	1,061	0,174
5,8	0,677	0,036	10,4	0,932	0,090	15,0	1,065	0,178
6,0	0,688	0,038	10,6	0,940	0,094	15,2	1,069	0,182
6,2	0,702	0,039	10,8	0,948	0,097	15,4	1,073	0,187
6,4	0,716	0,041	11,0	0,956	0,101	15,6	1,077	0,191

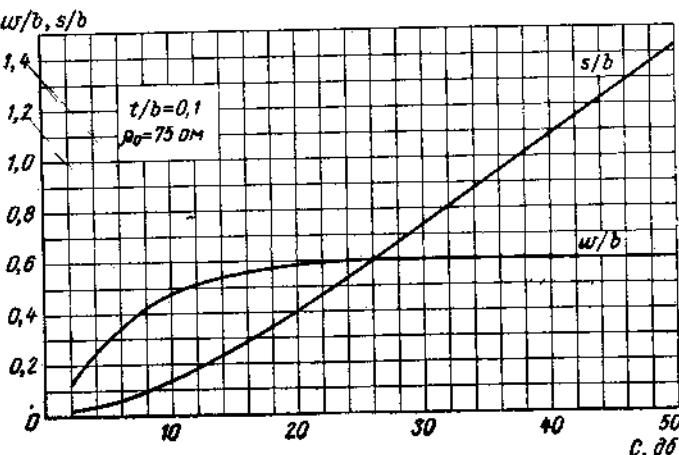
Продолжение табл. 5.8

$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b
15,8	1,081	0,197	25,4	1,164	0,462	34,8	1,174	0,768
16,0	1,086	0,201	25,6	1,164	0,468	35,0	1,174	0,774
16,2	1,088	0,206	25,8	1,165	0,477	35,2	1,174	0,780
16,4	1,093	0,211	26,0	1,166	0,481	35,4	1,174	0,788
16,6	1,095	0,215	26,2	1,166	0,486	35,6	1,175	0,794
16,8	1,099	0,220	26,4	1,167	0,493	35,8	1,175	0,800
17,0	1,102	0,225	26,6	1,167	0,500	36,0	1,175	0,808
17,2	1,104	0,230	26,8	1,168	0,506	36,2	1,175	0,813
17,4	1,107	0,235	27,0	1,168	0,511	36,4	1,175	0,820
17,6	1,110	0,240	27,2	1,168	0,518	36,6	1,175	0,827
17,8	1,112	0,246	27,4	1,169	0,524	36,8	1,175	0,834
18,0	1,114	0,251	27,6	1,169	0,531	37,0	1,175	0,840
18,2	1,117	0,256	27,8	1,170	0,538	37,2	1,175	0,847
18,4	1,119	0,262	28,0	1,170	0,544	37,4	1,175	0,853
18,6	1,121	0,267	28,2	1,170	0,550	37,6	1,175	0,861
18,8	1,123	0,272	28,4	1,170	0,559	37,8	1,175	0,868
19,0	1,125	0,278	28,6	1,170	0,564	38,0	1,175	0,874
19,2	1,127	0,282	28,8	1,171	0,570	38,2	1,175	0,881
19,4	1,129	0,288	29,0	1,171	0,577	38,4	1,175	0,888
19,6	1,130	0,293	29,2	1,171	0,584	38,6	1,175	0,896
19,8	1,132	0,299	29,4	1,171	0,590	38,8	1,175	0,901
20,0	1,133	0,304	29,6	1,172	0,596	39,0	1,175	0,909
20,2	1,135	0,309	29,8	1,172	0,604	39,2	1,175	0,916
20,4	1,137	0,315	30,0	1,172	0,610	39,4	1,175	0,922
20,6	1,139	0,321	30,2	1,172	0,616	39,6	1,175	0,930
20,8	1,140	0,328	30,4	1,172	0,623	39,8	1,175	0,937
21,0	1,141	0,332	30,6	1,172	0,630	40,0	1,175	0,943
21,2	1,142	0,338	30,8	1,173	0,636	40,2	1,175	0,950
21,4	1,144	0,344	31,0	1,173	0,643	40,4	1,175	0,959
21,6	1,145	0,349	31,2	1,173	0,649	40,6	1,175	0,965
21,8	1,146	0,356	31,4	1,173	0,656	40,8	1,175	0,971
22,0	1,148	0,360	31,6	1,173	0,661	41,0	1,175	0,980
22,2	1,149	0,366	31,8	1,173	0,668	41,2	1,175	0,986
22,4	1,150	0,372	32,0	1,173	0,675	41,4	1,175	0,992
22,6	1,151	0,379	32,2	1,173	0,680	41,6	1,175	1,000
22,8	1,152	0,384	32,4	1,173	0,689	41,8	1,175	1,006
23,0	1,153	0,390	32,6	1,173	0,694	42,0	1,175	1,012
23,2	1,154	0,395	32,8	1,174	0,701	42,2	1,175	1,019
23,4	1,155	0,402	33,0	1,174	0,708	42,4	1,175	1,026
23,6	1,156	0,408	33,2	1,174	0,714	42,6	1,175	1,033
23,8	1,157	0,414	33,4	1,174	0,720	42,8	1,175	1,040
24,0	1,158	0,420	33,6	1,174	0,728	43,0	1,175	1,047
24,2	1,159	0,426	33,8	1,174	0,734	43,2	1,175	1,052
24,4	1,160	0,432	34,0	1,174	0,740	43,4	1,175	1,060
24,6	1,161	0,438	34,2	1,174	0,748	43,6	1,175	1,065
24,8	1,162	0,444	34,4	1,174	0,753	43,8	1,175	1,071
25,0	1,163	0,450	34,6	1,174	0,760	44,0	1,175	1,080
25,2	1,163	0,456						

Таблица 5.9

Зависимость w/b и s/b от переходного затухания $C, \text{дБ}$ полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,1, \rho_0 = 75 \text{ ом}, \epsilon_r = 1$$



$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b
2,0	0,122	0,918	2,6	0,156	0,024	3,2	0,194	0,031
2,2	0,134	0,020	2,8	0,168	0,026	3,4	0,206	0,033
2,4	0,146	0,022	3,0	0,182	0,028	3,6	0,219	0,036

Продолжение табл. 5.9

<i>C.</i> <i>δб</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C.</i> <i>δб</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C.</i> <i>δб</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
3,8	0,230	0,038	12,0	0,512	0,184	20,2	0,594	0,414
4,0	0,242	0,041	12,2	0,516	0,190	20,4	0,595	0,420
4,2	0,255	0,044	12,4	0,520	0,194	20,6	0,596	0,426
4,4	0,266	0,046	12,6	0,523	0,199	20,8	0,596	0,432
4,6	0,277	0,049	12,8	0,526	0,204	21,0	0,597	0,438
4,8	0,288	0,052	13,0	0,529	0,210	21,2	0,598	0,444
5,0	0,300	0,054	13,2	0,533	0,215	21,4	0,598	0,449
5,2	0,312	0,057	13,4	0,536	0,220	21,6	0,599	0,456
5,4	0,325	0,060	13,6	0,540	0,226	21,8	0,599	0,462
5,6	0,334	0,063	13,8	0,542	0,230	22,0	0,600	0,468
5,8	0,344	0,066	14,0	0,545	0,236	22,2	0,600	0,475
6,0	0,354	0,069	14,2	0,548	0,242	22,4	0,601	0,480
6,2	0,363	0,072	14,4	0,550	0,246	22,6	0,601	0,488
6,4	0,370	0,075	14,6	0,553	0,252	22,8	0,602	0,494
6,6	0,378	0,078	14,8	0,555	0,258	23,0	0,602	0,500
6,8	0,385	0,081	15,0	0,557	0,264	23,2	0,603	0,506
7,0	0,392	0,085	15,2	0,560	0,270	23,4	0,603	0,513
7,2	0,398	0,088	15,4	0,562	0,276	23,6	0,604	0,520
7,4	0,405	0,092	15,6	0,564	0,282	23,8	0,604	0,527
7,6	0,411	0,098	15,8	0,566	0,288	24,0	0,604	0,533
7,8	0,417	0,099	16,0	0,568	0,294	24,2	0,604	0,540
8,0	0,424	0,102	16,2	0,570	0,300	24,4	0,605	0,547
8,2	0,429	0,105	16,4	0,571	0,306	24,6	0,605	0,552
8,4	0,435	0,109	16,6	0,573	0,310	24,8	0,605	0,560
8,6	0,440	0,113	16,8	0,574	0,316	25,0	0,606	0,566
8,8	0,445	0,116	17,0	0,576	0,322	25,2	0,606	0,573
9,0	0,450	0,120	17,2	0,577	0,327	25,4	0,606	0,580
9,2	0,455	0,124	17,4	0,578	0,334	25,6	0,606	0,588
9,4	0,460	0,128	17,6	0,580	0,340	25,8	0,606	0,594
9,6	0,464	0,132	17,8	0,581	0,346	26,0	0,606	0,601
9,8	0,469	0,136	18,0	0,582	0,351	26,2	0,607	0,609
10,0	0,474	0,140	18,2	0,583	0,357	26,4	0,607	0,616
10,2	0,477	0,144	18,4	0,585	0,362	26,6	0,607	0,622
10,4	0,482	0,148	18,6	0,586	0,368	26,8	0,607	0,630
10,6	0,486	0,152	18,8	0,587	0,374	27,0	0,607	0,636
10,8	0,490	0,158	19,0	0,588	0,380	27,2	0,607	0,643
11,0	0,494	0,162	19,2	0,589	0,386	27,4	0,608	0,650
11,2	0,498	0,166	19,4	0,590	0,390	27,6	0,608	0,657
11,4	0,502	0,170	19,6	0,591	0,397	27,8	0,608	0,664
11,6	0,505	0,175	19,8	0,592	0,403	28,0	0,608	0,671
11,8	0,509	0,180	20,0	0,593	0,409	28,2	0,608	0,678

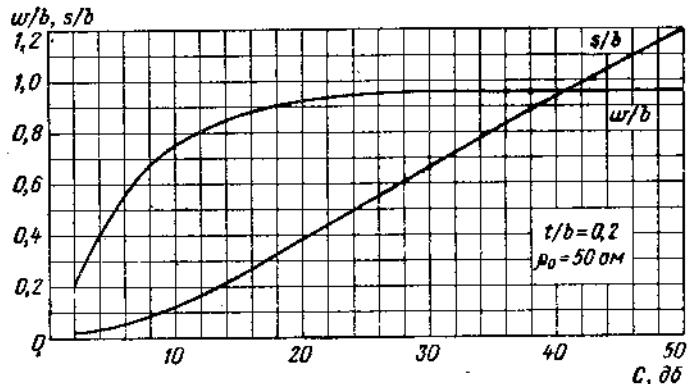
Продолжение табл. 5.9

<i>C.</i> <i>δб</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C.</i> <i>δб</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C.</i> <i>δб</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
28,4	0,608	0,686	35,8	0,610	0,944	43,0	0,610	1,190
28,6	0,608	0,692	36,0	0,610	0,951	43,2	0,610	1,196
28,8	0,608	0,700	36,2	0,610	0,958	43,4	0,610	1,202
29,0	0,608	0,707	36,4	0,610	0,966	43,6	0,610	1,209
29,2	0,608	0,713	36,6	0,610	0,972	43,8	0,610	1,217
29,4	0,609	0,721	36,8	0,610	0,979	44,0	0,610	1,224
29,6	0,609	0,729	37,0	0,610	0,985	44,2	0,610	1,230
29,8	0,609	0,736	37,2	0,610	0,992	44,4	0,610	1,239
30,0	0,609	0,742	37,4	0,610	1,000	44,6	0,610	1,243
30,2	0,609	0,748	37,6	0,610	1,006	44,8	0,610	1,250
30,4	0,609	0,757	37,8	0,610	1,012	45,0	0,610	1,258
30,6	0,609	0,761	38,0	0,610	1,020	45,2	0,610	1,264
30,8	0,609	0,768	38,2	0,610	1,027	45,4	0,610	1,272
31,0	0,609	0,776	38,4	0,610	1,034	45,6	0,610	1,278
31,2	0,609	0,782	38,6	0,610	1,040	45,8	0,610	1,286
31,4	0,609	0,790	38,8	0,610	1,046	46,0	0,610	1,292
31,6	0,609	0,798	39,0	0,610	1,054	46,2	0,610	1,299
31,8	0,609	0,803	39,2	0,610	1,060	46,4	0,610	1,302
32,0	0,609	0,810	39,4	0,610	1,068	46,6	0,610	1,311
32,2	0,610	0,817	39,6	0,610	1,075	46,8	0,610	1,320
32,4	0,610	0,824	39,8	0,610	1,080	47,0	0,610	1,327
32,6	0,610	0,832	40,0	0,610	1,088	47,2	0,610	1,334
32,8	0,610	0,840	40,2	0,610	1,096	47,4	0,610	1,341
33,0	0,610	0,846	40,4	0,610	1,102	47,6	0,610	1,349
33,2	0,610	0,852	40,6	0,610	1,108	47,8	0,610	1,355
33,4	0,610	0,860	40,8	0,610	1,116	48,0	0,610	1,362
33,6	0,610	0,868	41,0	0,610	1,122	48,2	0,610	1,369
33,8	0,610	0,874	41,2	0,610	1,129	48,4	0,610	1,376
34,0	0,610	0,881	41,4	0,610	1,136	48,6	0,610	1,382
34,2	0,610	0,888	41,6	0,610	1,141	48,8	0,610	1,388
34,4	0,610	0,896	41,8	0,610	1,150	49,0	0,610	1,396
34,6	0,610	0,903	42,0	0,610	1,156	49,2	0,610	1,402
34,8	0,610	0,910	42,2	0,610	1,162	49,4	0,610	1,410
35,0	0,610	0,916	42,4	0,610	1,168	49,6	0,610	1,415
35,2	0,610	0,924	42,6	0,610	1,174	49,8	0,610	1,422
35,4	0,610	0,930	42,8	0,610	1,182	50,0	0,610	1,430
35,6	0,610	0,938						

Таблица 5.10

Зависимость w/b и s/b от переходного затухания C , дБ
полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,2, \rho_0 = 50 \text{ ом}, \varepsilon_r = 1$$



$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b
2,0	0,200	0,012	6,6	0,580	0,069	11,2	0,786	0,158
2,2	0,220	0,014	6,8	0,596	0,072	11,4	0,791	0,162
2,4	0,240	0,016	7,0	0,606	0,075	11,6	0,798	0,165
2,6	0,260	0,018	7,2	0,616	0,078	11,8	0,803	0,171
2,8	0,280	0,020	7,4	0,628	0,082	12,0	0,809	0,176
3,0	0,295	0,022	7,6	0,640	0,085	12,2	0,813	0,180
3,2	0,314	0,024	7,8	0,650	0,089	12,4	0,818	0,184
3,4	0,334	0,026	8,0	0,660	0,092	12,6	0,822	0,190
3,6	0,355	0,028	8,2	0,671	0,096	12,8	0,826	0,194
3,8	0,373	0,031	8,4	0,681	0,099	13,0	0,830	0,200
4,0	0,390	0,033	8,6	0,689	0,103	13,2	0,834	0,204
4,2	0,407	0,036	8,8	0,699	0,107	13,4	0,838	0,209
4,4	0,422	0,038	9,0	0,707	0,111	13,6	0,842	0,214
4,6	0,440	0,041	9,2	0,716	0,115	13,8	0,844	0,220
4,8	0,460	0,043	9,4	0,724	0,119	14,0	0,848	0,225
5,0	0,472	0,046	9,6	0,732	0,123	14,2	0,850	0,229
5,2	0,486	0,048	9,8	0,739	0,126	14,4	0,854	0,234
5,4	0,500	0,051	10,0	0,747	0,131	14,6	0,856	0,239
5,6	0,516	0,054	10,2	0,754	0,135	14,8	0,859	0,244
5,8	0,530	0,057	10,4	0,761	0,139	15,0	0,861	0,249
6,0	0,540	0,060	10,6	0,766	0,143	15,2	0,864	0,254
6,2	0,555	0,063	10,8	0,774	0,148	15,4	0,866	0,259
6,4	0,566	0,066	11,0	0,780	0,153	15,6	0,868	0,264

Продолжение табл. 5.10

$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b	$C, \text{дБ}$	w/b	s/b
15,8	0,872	0,270	25,2	0,941	0,532	34,6	0,958	0,792
16,0	0,874	0,275	25,4	0,942	0,538	34,8	0,958	0,798
16,2	0,876	0,280	25,6	0,942	0,544	35,0	0,958	0,804
16,4	0,878	0,288	25,8	0,943	0,550	35,2	0,958	0,810
16,6	0,881	0,292	26,0	0,944	0,555	35,4	0,958	0,814
16,8	0,884	0,298	26,2	0,944	0,560	35,6	0,958	0,821
17,0	0,886	0,304	26,4	0,945	0,566	35,8	0,958	0,825
17,2	0,888	0,310	26,6	0,945	0,572	36,0	0,958	0,831
17,4	0,889	0,314	26,8	0,945	0,578	36,2	0,959	0,836
17,6	0,890	0,319	27,0	0,946	0,584	36,4	0,959	0,841
17,8	0,893	0,325	27,2	0,946	0,590	36,6	0,959	0,848
18,0	0,896	0,330	27,4	0,947	0,595	36,8	0,959	0,853
18,2	0,897	0,336	27,6	0,947	0,600	37,0	0,959	0,857
18,4	0,899	0,343	27,8	0,947	0,606	37,2	0,959	0,863
18,6	0,901	0,348	28,0	0,948	0,611	37,4	0,959	0,868
18,8	0,903	0,354	28,2	0,948	0,618	37,6	0,959	0,873
19,0	0,905	0,360	28,4	0,949	0,624	37,8	0,959	0,878
19,2	0,906	0,366	28,6	0,949	0,628	38,0	0,959	0,884
19,4	0,908	0,370	28,8	0,950	0,634	38,2	0,959	0,890
19,6	0,910	0,376	29,0	0,950	0,640	38,4	0,959	0,894
19,8	0,911	0,383	29,2	0,951	0,645	38,6	0,959	0,900
20,0	0,913	0,388	29,4	0,951	0,650	38,8	0,959	0,906
20,2	0,914	0,395	29,6	0,951	0,656	39,0	0,959	0,911
20,4	0,915	0,400	29,8	0,952	0,664	39,2	0,959	0,916
20,6	0,916	0,406	30,0	0,952	0,668	39,4	0,959	0,921
20,8	0,918	0,410	30,2	0,953	0,673	39,6	0,959	0,926
21,0	0,920	0,416	30,4	0,953	0,679	39,8	0,959	0,932
21,2	0,921	0,424	30,6	0,953	0,684	40,0	0,959	0,938
21,4	0,922	0,428	30,8	0,954	0,690	40,2	0,959	0,942
21,6	0,923	0,431	31,0	0,954	0,696	40,4	0,959	0,948
21,8	0,924	0,437	31,2	0,954	0,700	40,6	0,959	0,952
22,0	0,925	0,441	31,4	0,955	0,706	40,8	0,959	0,956
22,2	0,927	0,448	31,6	0,955	0,711	41,0	0,959	0,963
22,4	0,928	0,454	31,8	0,955	0,716	41,2	0,959	0,969
22,6	0,929	0,460	32,0	0,955	0,721	41,4	0,959	0,973
22,8	0,930	0,465	32,2	0,955	0,726	41,6	0,959	0,979
23,0	0,931	0,470	32,4	0,955	0,732	41,8	0,959	0,984
23,2	0,932	0,476	32,6	0,956	0,738	42,0	0,959	0,990
23,4	0,933	0,482	32,8	0,956	0,744	42,2	0,959	0,994
23,6	0,934	0,488	33,0	0,956	0,749	42,4	0,959	1,000
23,8	0,935	0,494	33,2	0,956	0,754	42,6	0,959	1,005
24,0	0,936	0,500	33,4	0,957	0,760	42,8	0,959	1,010
24,2	0,937	0,504	33,6	0,957	0,768	43,0	0,959	1,015
24,4	0,938	0,510	33,8	0,957	0,774	43,2	0,959	1,021
24,6	0,939	0,516	34,0	0,957	0,777	43,4	0,959	1,026
24,8	0,939	0,522	34,2	0,957	0,781	43,6	0,959	1,031
25,0	0,940	0,526	34,4	0,957	0,787	43,8	0,959	1,036

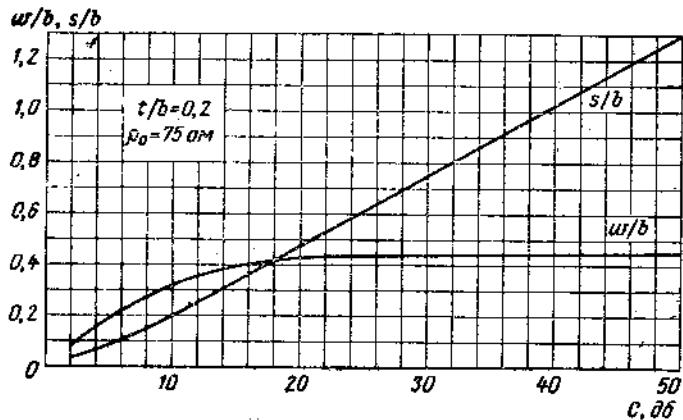
Продолжение табл. 5.10

<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
44,0	0,959	1,043	46,2	0,959	1,101	48,2	0,959	1,154
44,2	0,959	1,047	46,4	0,959	1,107	48,4	0,959	1,160
44,4	0,959	1,054	46,6	0,959	1,111	48,6	0,959	1,164
44,6	0,959	1,059	46,8	0,959	1,116	48,8	0,959	1,171
44,8	0,959	1,065	47,0	0,959	1,123	49,0	0,959	1,175
45,0	0,959	1,069	47,2	0,959	1,127	49,2	0,959	1,180
45,2	0,959	1,074	47,4	0,959	1,133	49,4	0,959	1,186
45,4	0,959	1,079	47,6	0,959	1,139	49,6	0,959	1,191
45,6	0,959	1,083	47,8	0,959	1,143	49,8	0,959	1,197
45,8	0,959	1,090	48,0	0,959	1,150	50,0	0,959	1,200
46,0	0,959	1,096						

Таблица 5.11

Зависимость *w/b* и *s/b* от переходного затухания *C, дБ*
полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,2, \rho_0 = 75 \text{ ом}, \epsilon_r = 1$$



<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
2,0	0,082	0,034	3,2	0,126	0,057	4,4	0,167	0,080
2,2	0,090	0,038	3,4	0,133	0,060	4,6	0,173	0,082
2,4	0,097	0,042	3,6	0,139	0,065	4,8	0,181	0,089
2,6	0,104	0,045	3,8	0,148	0,069	5,0	0,188	0,092
2,8	0,112	0,049	4,0	0,154	0,073	5,2	0,194	0,096
3,0	0,119	0,053	4,2	0,160	0,077	5,4	0,200	0,101

Продолжение табл. 5.11

<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
5,6	0,206	0,105	13,4	0,381	0,294	21,2	0,433	0,524
5,8	0,216	0,109	13,6	0,384	0,300	21,4	0,434	0,530
6,0	0,221	0,113	13,8	0,387	0,307	21,6	0,434	0,536
6,2	0,226	0,116	14,0	0,390	0,312	21,8	0,435	0,542
6,4	0,233	0,120	14,2	0,392	0,317	22,0	0,435	0,548
6,6	0,239	0,125	14,4	0,394	0,325	22,2	0,436	0,554
6,8	0,246	0,128	14,6	0,396	0,330	22,4	0,436	0,560
7,0	0,250	0,133	14,8	0,399	0,336	22,6	0,437	0,566
7,2	0,256	0,138	15,0	0,401	0,341	22,8	0,437	0,572
7,4	0,262	0,142	15,2	0,403	0,347	23,0	0,438	0,578
7,6	0,267	0,146	15,4	0,405	0,353	23,2	0,438	0,585
7,8	0,273	0,150	15,6	0,407	0,359	23,4	0,439	0,591
8,0	0,278	0,155	15,8	0,409	0,364	23,6	0,439	0,597
8,2	0,283	0,160	16,0	0,410	0,370	23,8	0,439	0,604
8,4	0,288	0,164	16,2	0,412	0,376	24,0	0,440	0,610
8,6	0,293	0,168	16,4	0,413	0,382	24,2	0,440	0,614
8,8	0,298	0,174	16,6	0,414	0,388	24,4	0,441	0,621
9,0	0,302	0,178	16,8	0,415	0,394	24,6	0,441	0,627
9,2	0,306	0,182	17,0	0,416	0,400	24,8	0,442	0,632
9,4	0,311	0,187	17,2	0,418	0,406	25,0	0,442	0,639
9,6	0,315	0,192	17,4	0,419	0,412	25,2	0,442	0,644
9,8	0,319	0,197	17,6	0,420	0,417	25,4	0,443	0,650
10,0	0,323	0,201	17,8	0,421	0,424	25,6	0,443	0,655
10,2	0,327	0,206	18,0	0,422	0,430	25,8	0,443	0,662
10,4	0,331	0,212	18,2	0,423	0,434	26,0	0,444	0,667
10,6	0,335	0,217	18,4	0,424	0,442	26,2	0,444	0,672
10,8	0,338	0,222	18,6	0,425	0,448	26,4	0,444	0,678
11,0	0,342	0,228	18,8	0,426	0,454	26,6	0,444	0,683
11,2	0,346	0,233	19,0	0,426	0,460	26,8	0,444	0,690
11,4	0,348	0,238	19,2	0,427	0,466	27,0	0,445	0,695
11,6	0,352	0,243	19,4	0,428	0,472	27,2	0,445	0,700
11,8	0,356	0,248	19,6	0,428	0,478	27,4	0,445	0,706
12,0	0,360	0,254	19,8	0,429	0,483	27,6	0,445	0,712
12,2	0,363	0,260	20,0	0,430	0,488	27,8	0,445	0,716
12,4	0,366	0,266	20,2	0,430	0,495	28,0	0,445	0,723
12,6	0,369	0,271	20,4	0,431	0,500	28,2	0,445	0,728
12,8	0,372	0,277	20,6	0,431	0,506	28,4	0,446	0,734
13,0	0,375	0,283	20,8	0,432	0,512	28,6	0,446	0,740
13,2	0,378	0,289	21,0	0,433	0,518	28,8	0,446	0,745

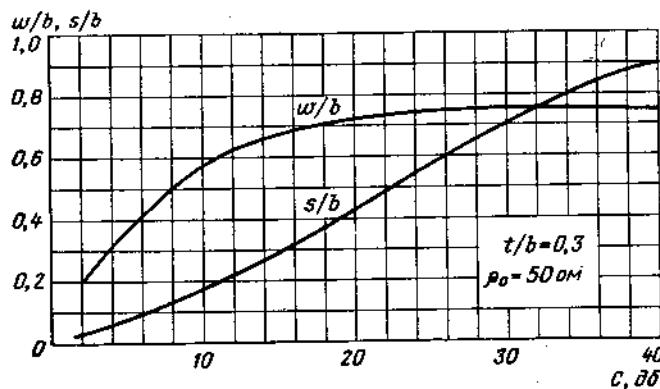
Продолжение табл. 5.11

<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
29,0	0,446	0,750	36,2	0,448	0,939	43,4	0,448	1,126
29,2	0,446	0,755	36,4	0,448	0,944	43,6	0,448	1,131
29,4	0,446	0,760	36,6	0,448	0,949	43,8	0,448	1,137
29,6	0,446	0,765	36,8	0,448	0,953	44,0	0,448	1,142
29,8	0,447	0,770	37,0	0,448	0,960	44,2	0,448	1,147
30,0	0,447	0,776	37,2	0,448	0,964	44,4	0,448	1,153
30,2	0,447	0,780	37,4	0,448	0,969	44,6	0,448	1,157
30,4	0,447	0,786	37,6	0,448	0,974	44,8	0,448	1,164
30,6	0,447	0,792	37,8	0,448	0,980	45,0	0,448	1,168
30,8	0,447	0,797	38,0	0,448	0,985	45,2	0,448	1,174
31,0	0,447	0,803	38,2	0,448	0,990	45,4	0,448	1,179
31,2	0,448	0,808	38,4	0,448	0,996	45,6	0,448	1,184
31,4	0,448	0,814	38,6	0,448	1,001	45,8	0,448	1,189
31,6	0,448	0,819	38,8	0,448	1,006	46,0	0,448	1,194
31,8	0,448	0,824	39,0	0,448	1,011	46,2	0,448	1,200
32,0	0,448	0,829	39,2	0,448	1,016	46,4	0,448	1,205
32,2	0,448	0,833	39,4	0,448	1,022	46,6	0,448	1,209
32,4	0,448	0,839	39,6	0,448	1,027	46,8	0,448	1,216
32,6	0,448	0,843	39,8	0,448	1,032	47,0	0,448	1,220
32,8	0,448	0,850	40,0	0,448	1,038	47,2	0,448	1,224
33,0	0,448	0,853	40,2	0,448	1,044	47,4	0,448	1,230
33,2	0,448	0,860	40,4	0,448	1,048	47,6	0,448	1,236
33,4	0,448	0,866	40,6	0,448	1,053	47,8	0,448	1,241
33,6	0,448	0,870	40,8	0,448	1,058	48,0	0,448	1,247
33,8	0,448	0,876	41,0	0,448	1,064	48,2	0,448	1,252
34,0	0,448	0,881	41,2	0,448	1,069	48,4	0,448	1,257
34,2	0,448	0,886	41,4	0,448	1,074	48,6	0,448	1,262
34,4	0,448	0,892	41,6	0,448	1,080	48,8	0,448	1,268
34,6	0,448	0,896	41,8	0,448	1,085	49,0	0,448	1,273
34,8	0,448	0,902	42,0	0,448	1,090	49,2	0,448	1,278
35,0	0,448	0,906	42,2	0,448	1,095	49,4	0,448	1,283
35,2	0,448	0,912	42,4	0,448	1,100	49,6	0,448	1,288
35,4	0,448	0,918	42,6	0,448	1,104	49,8	0,448	1,294
35,6	0,448	0,923	42,8	0,448	1,110	50,0	0,448	1,299
35,8	0,448	0,928	43,0	0,448	1,116			
36,0	0,448	0,933	43,2	0,448	1,120			

Таблица 5.12

Зависимость *w/b* и *s/b* от переходного затухания *C, дБ* полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,3, \rho_0 = 50 \text{ ом}, \varepsilon_r = 1$$



<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
2,0	0,190	0,028	6,6	0,432	0,110	11,2	0,603	0,200
2,2	0,200	0,032	6,8	0,442	0,114	11,4	0,609	0,205
2,4	0,218	0,035	7,0	0,450	0,118	11,6	0,614	0,210
2,6	0,228	0,038	7,2	0,459	0,122	11,8	0,620	0,215
2,8	0,231	0,041	7,4	0,466	0,126	12,0	0,624	0,219
3,0	0,254	0,045	7,6	0,475	0,129	12,2	0,629	0,224
3,2	0,264	0,048	7,8	0,483	0,132	12,4	0,634	0,229
3,4	0,280	0,051	8,0	0,491	0,136	12,6	0,639	0,233
3,6	0,290	0,055	8,2	0,500	0,140	12,8	0,643	0,239
3,8	0,300	0,058	8,4	0,507	0,144	13,0	0,648	0,244
4,0	0,310	0,062	8,6	0,515	0,148	13,2	0,652	0,250
4,2	0,320	0,065	8,8	0,523	0,152	13,4	0,656	0,255
4,4	0,330	0,068	9,0	0,530	0,156	13,6	0,660	0,260
4,6	0,340	0,072	9,2	0,537	0,160	13,8	0,663	0,266
4,8	0,350	0,076	9,4	0,545	0,164	14,0	0,667	0,272
5,0	0,360	0,080	9,6	0,552	0,168	14,2	0,670	0,276
5,2	0,369	0,084	9,8	0,559	0,172	14,4	0,672	0,282
5,4	0,380	0,087	10,0	0,566	0,176	14,6	0,675	0,288
5,6	0,389	0,090	10,2	0,572	0,180	14,8	0,678	0,293
5,8	0,399	0,095	10,4	0,579	0,184	15,0	0,680	0,299
6,0	0,406	0,098	10,6	0,585	0,188	15,2	0,683	0,304
6,2	0,414	0,102	10,8	0,591	0,192	15,4	0,685	0,310
6,4	0,424	0,106	11,0	0,597	0,196	15,6	0,687	0,316

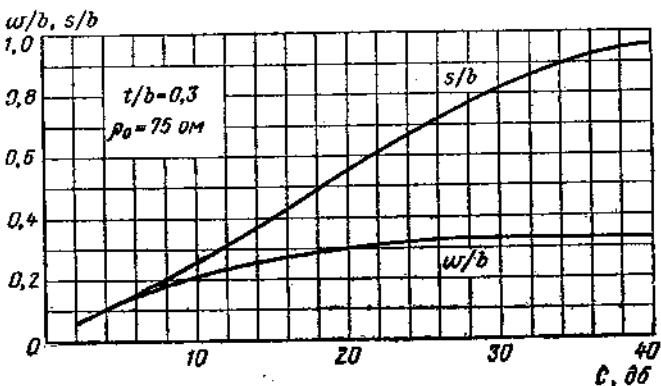
Таблица 5.13

Продолжение

<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
15,8	0,690	0,320	24,0	0,744	0,557	32,2	0,763	0,774
16,0	0,692	0,326	24,2	0,744	0,562	32,4	0,763	0,779
16,2	0,694	0,332	24,4	0,745	0,569	32,6	0,764	0,783
16,4	0,696	0,339	24,6	0,745	0,574	32,8	0,764	0,787
16,6	0,698	0,344	24,8	0,746	0,579	33,0	0,764	0,792
16,8	0,700	0,349	25,0	0,746	0,584	33,2	0,765	0,796
17,0	0,702	0,355	25,2	0,747	0,590	33,4	0,765	0,800
17,2	0,704	0,360	25,4	0,748	0,596	33,6	0,765	0,804
17,4	0,705	0,367	25,6	0,749	0,602	33,8	0,765	0,807
17,6	0,707	0,373	25,8	0,749	0,608	34,0	0,765	0,812
17,8	0,709	0,379	26,0	0,750	0,613	34,2	0,766	0,816
18,0	0,710	0,385	26,2	0,750	0,619	34,4	0,766	0,820
18,2	0,712	0,390	26,4	0,751	0,624	34,6	0,766	0,824
18,4	0,713	0,396	26,6	0,751	0,630	34,8	0,766	0,827
18,6	0,715	0,402	26,8	0,752	0,635	35,0	0,766	0,831
18,8	0,716	0,408	27,0	0,752	0,640	35,2	0,766	0,834
19,0	0,718	0,414	27,2	0,753	0,644	35,4	0,766	0,838
19,2	0,720	0,420	27,4	0,754	0,651	35,6	0,766	0,842
19,4	0,721	0,426	27,6	0,754	0,657	35,8	0,766	0,844
19,6	0,722	0,432	27,8	0,754	0,662	36,0	0,766	0,847
19,8	0,724	0,438	28,0	0,755	0,668	36,2	0,767	0,851
20,0	0,726	0,444	28,2	0,755	0,674	36,4	0,767	0,854
20,2	0,726	0,450	28,4	0,756	0,680	36,6	0,767	0,857
20,4	0,727	0,456	28,6	0,756	0,684	36,8	0,767	0,860
20,6	0,728	0,461	28,8	0,757	0,690	37,0	0,768	0,863
20,8	0,729	0,468	29,0	0,757	0,695	37,2	0,768	0,865
21,0	0,730	0,473	29,2	0,757	0,700	37,4	0,768	0,868
21,2	0,731	0,479	29,4	0,758	0,706	37,6	0,768	0,871
21,4	0,732	0,484	29,6	0,758	0,710	37,8	0,768	0,874
21,6	0,733	0,490	29,8	0,759	0,716	38,0	0,768	0,876
21,8	0,734	0,496	30,0	0,759	0,721	38,2	0,768	0,879
22,0	0,735	0,501	30,2	0,760	0,726	38,4	0,768	0,881
22,2	0,736	0,507	30,4	0,760	0,730	38,6	0,768	0,883
22,4	0,737	0,512	30,6	0,760	0,736	38,8	0,768	0,886
22,6	0,738	0,518	30,8	0,761	0,740	39,0	0,768	0,888
22,8	0,739	0,524	31,0	0,761	0,744	39,2	0,768	0,891
23,0	0,740	0,530	31,2	0,761	0,750	39,4	0,768	0,893
23,2	0,741	0,534	31,4	0,762	0,756	39,6	0,768	0,895
23,4	0,742	0,540	31,6	0,762	0,760	39,8	0,768	0,898
23,6	0,742	0,546	31,8	0,762	0,765	40,0	0,768	0,900
23,8	0,743	0,551	32,0	0,763	0,770			

Зависимость w/b и s/b от переходного затухания $C, \text{дБ}$ полоскового направленного ответвителя

$$\frac{t}{b} = 0,3, \rho_0 = 75 \text{ ом}, \epsilon_r = 1$$



<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>	<i>C, дБ</i>	<i>w/b</i>	<i>s/b</i>
2,0	0,054	0,053	6,6	0,156	0,174	11,2	0,232	0,293
2,2	0,058	0,057	6,8	0,160	0,179	11,4	0,234	0,298
2,4	0,063	0,063	7,0	0,163	0,185	11,6	0,236	0,302
2,6	0,068	0,068	7,2	0,166	0,190	11,8	0,239	0,308
2,8	0,073	0,074	7,4	0,170	0,196	12,0	0,242	0,314
3,0	0,077	0,079	7,6	0,174	0,200	12,2	0,244	0,318
3,2	0,082	0,084	7,8	0,178	0,206	12,4	0,246	0,324
3,4	0,086	0,090	8,0	0,182	0,211	12,6	0,248	0,329
3,6	0,090	0,094	8,2	0,185	0,216	12,8	0,251	0,334
3,8	0,096	0,100	8,4	0,188	0,220	13,0	0,253	0,340
4,0	0,101	0,106	8,6	0,191	0,226	13,2	0,255	0,346
4,2	0,105	0,110	8,8	0,195	0,232	13,4	0,257	0,352
4,4	0,110	0,114	9,0	0,198	0,237	13,6	0,260	0,358
4,6	0,114	0,120	9,2	0,201	0,242	13,8	0,262	0,362
4,8	0,118	0,126	9,4	0,204	0,248	14,0	0,263	0,369
5,0	0,123	0,131	9,6	0,207	0,252	14,2	0,266	0,375
5,2	0,128	0,136	9,8	0,211	0,258	14,4	0,268	0,381
5,4	0,132	0,144	10,0	0,214	0,263	14,6	0,270	0,387
5,6	0,136	0,148	10,2	0,217	0,268	14,8	0,272	0,392
5,8	0,140	0,154	10,4	0,220	0,273	15,0	0,274	0,399
6,0	0,144	0,159	10,6	0,223	0,278	15,2	0,275	0,404
6,2	0,148	0,164	10,8	0,226	0,283	15,4	0,276	0,410
6,4	0,152	0,170	11,0	0,228	0,288	15,6	0,278	0,416

Продолжение табл. 5.13

$C, \text{дб}$	w/b	s/b	$C, \text{дб}$	w/b	s/b	$C, \text{дб}$	w/b	s/b
15,8	0,280	0,423	24,0	0,314	0,659	32,2	0,326	0,855
16,0	0,282	0,428	24,2	0,314	0,666	32,4	0,326	0,859
16,2	0,283	0,434	24,4	0,315	0,670	32,6	0,327	0,862
16,4	0,284	0,441	24,6	0,315	0,675	32,8	0,327	0,865
16,6	0,286	0,447	24,8	0,315	0,680	33,0	0,327	0,869
16,8	0,287	0,454	25,0	0,316	0,685	33,2	0,327	0,872
17,0	0,288	0,460	25,2	0,316	0,691	33,4	0,327	0,875
17,2	0,290	0,466	25,4	0,316	0,696	33,6	0,328	0,880
17,4	0,292	0,472	25,6	0,317	0,701	33,8	0,328	0,882
17,6	0,293	0,478	25,8	0,317	0,706	34,0	0,328	0,885
17,8	0,294	0,485	26,0	0,318	0,711	34,2	0,328	0,888
18,0	0,296	0,490	26,2	0,318	0,716	34,4	0,328	0,891
18,2	0,297	0,497	26,4	0,319	0,721	34,6	0,328	0,894
18,4	0,298	0,502	26,6	0,319	0,726	34,8	0,329	0,896
18,6	0,300	0,509	26,8	0,319	0,731	35,0	0,329	0,899
18,8	0,301	0,515	27,0	0,320	0,736	35,2	0,329	0,902
19,0	0,302	0,520	27,2	0,320	0,741	35,4	0,329	0,904
19,2	0,302	0,527	27,4	0,320	0,746	35,6	0,329	0,907
19,4	0,303	0,532	27,6	0,320	0,751	35,8	0,329	0,910
19,6	0,304	0,538	27,8	0,320	0,756	36,0	0,329	0,912
19,8	0,304	0,544	28,0	0,321	0,760	36,2	0,330	0,915
20,0	0,305	0,550	28,2	0,321	0,766	36,4	0,330	0,917
20,2	0,306	0,556	28,4	0,321	0,770	36,6	0,330	0,920
20,4	0,306	0,562	28,6	0,322	0,776	36,8	0,330	0,922
20,6	0,307	0,567	28,8	0,322	0,780	37,0	0,330	0,924
20,8	0,307	0,572	29,0	0,322	0,785	37,2	0,330	0,926
21,0	0,308	0,579	29,2	0,323	0,789	37,4	0,330	0,928
21,2	0,308	0,584	29,4	0,323	0,794	37,6	0,330	0,930
21,4	0,309	0,589	29,6	0,323	0,799	37,8	0,330	0,932
21,6	0,309	0,595	29,8	0,324	0,804	38,0	0,330	0,934
21,8	0,310	0,600	30,0	0,324	0,809	38,2	0,330	0,936
22,0	0,310	0,606	30,2	0,324	0,813	38,4	0,330	0,938
22,2	0,311	0,612	30,4	0,324	0,818	38,6	0,330	0,940
22,4	0,311	0,616	30,6	0,324	0,823	38,8	0,330	0,941
22,6	0,312	0,622	30,8	0,325	0,827	39,0	0,330	0,942
22,8	0,312	0,628	31,0	0,325	0,833	39,2	0,330	0,944
23,0	0,312	0,633	31,2	0,325	0,835	39,4	0,330	0,945
23,2	0,313	0,639	31,4	0,326	0,840	39,6	0,330	0,946
23,4	0,313	0,644	31,6	0,326	0,843	39,8	0,330	0,947
23,6	0,313	0,649	31,8	0,326	0,847	40,0	0,330	0,948
23,8	0,314	0,654	32,0	0,326	0,851			

С другой стороны, для связанных идеально направленных полосковых линий имеем

$$\frac{\rho_{++}}{\rho_{+-}} = \frac{\sqrt{C} + 1}{\sqrt{C} - 1}, \quad (5.53)$$

где C — переходное затухание направленного ответвителя (в разах).

Направленный ответвитель на связанных полосковых линиях является так называемым противонаправленным ответвителем или ответвителем с направленностью второго типа (см. гл. 2).

Решение уравнений (5.51) и (5.53) дает значения ρ_{++} и ρ_{+-} , обеспечивающие одновременно заданное переходное затухание и идеальную направленность системы.

Учитывая связь ρ_{++} и ρ_{+-} с геометрическими размерами связанных полосок $\left(\frac{w}{b}\right)$ и $\left(\frac{s}{b}\right)$ для различных линий [см. (5.42), (5.43), (5.48)–(5.50)], можно построить зависимости

$$\frac{w}{b} = f_1(C_{\text{дб}}) \text{ и } \frac{s}{b} = f_2(C_{\text{дб}}), \quad (5.54)$$

где w — ширина полоски;

s — расстояние между полосками;

b — расстояние между основаниями.

Эти зависимости (5.54) даны в виде табл. 5.4–5.13 и графиков на таблицах. Точное определение $\frac{w}{b}$ и $\frac{s}{b}$ следует проводить по таблицам¹, графики дают общее представление о характере зависимости.

5.7. ЕМКОСТЬ СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ДВУХ ОДИНАКОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПОЛОСОК

C_p — емкость (рис. 5.24) на единицу длины горизонтальной верхней или нижней поверхности полоски относительно ближайшей металлической пластины.

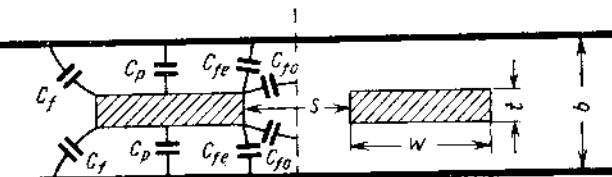
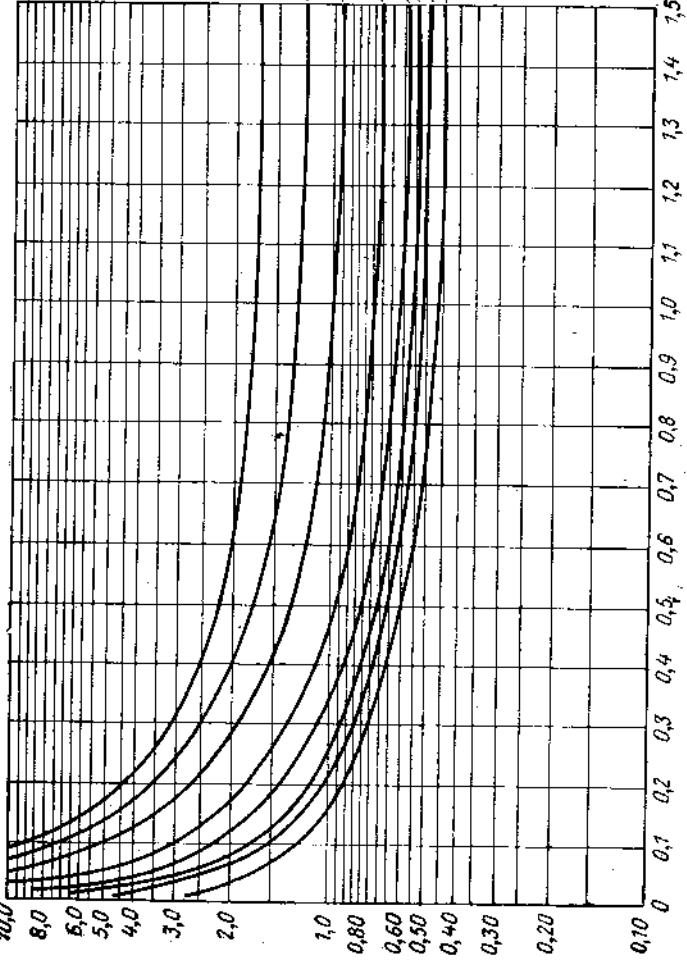
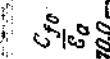


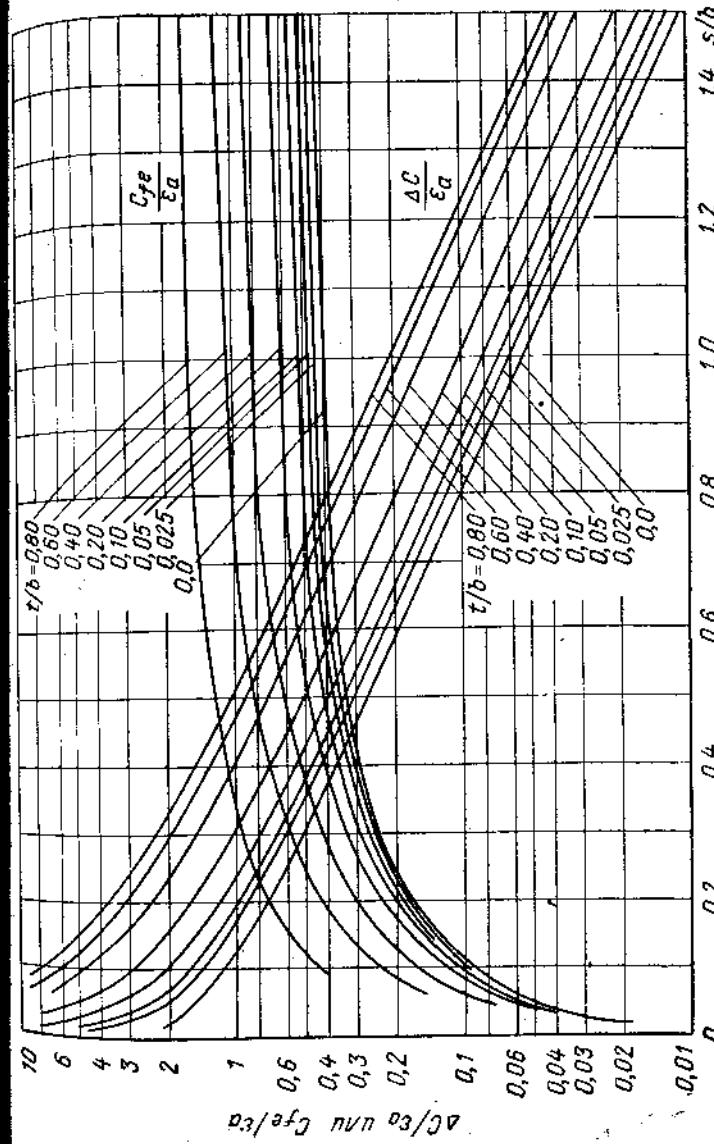
Рис. 5.24. Поперечное сечение связанный полосковой линии с полосками конечной ширины.

¹ Таблицы и графики обработаны Ф. У. Керстенецкой и Е. В. Соловьевой.



$\frac{t}{b}$
0,80
0,60
0,40
0,20
0,10
0,05
0,025
0,0

Рис. 5.25. График зависимости $\frac{C_{f0}}{\varepsilon_a}$ от $\frac{t}{b}$.



$\frac{t}{b}$
0,80
0,60
0,40
0,20
0,10
0,05
0,025
0,0

267

C_{fe} — емкость (рис. 5.24) одного угла и половины вертикальной поверхности полоски по отношению к ближайшей металлической пластине на единицу длины. Эта емкость определяется в области связи между полосками при четном типе возбуждаемых колебаний. График дан на рис. 5.26.

C_{f0} — та же емкость при нечетном типе возбуждаемых колебаний. График зависимости $\frac{C_{f0}}{\epsilon_a}$ от $\frac{s}{b}$ дан на рис. 5.25.

C_f — емкость одного угла и половины вертикальной поверхности изолированной полоски и ближайшей металлической пластины, отнесенная к единице длины; рассчитывается, как краевая емкость полоски полубесконечной ширины.

На рис. 5.26 показана результирующая емкость между полосками (на единицу длины):

$$\frac{\Delta C}{\epsilon_a} = \frac{C_{f0}}{\epsilon_a} - \frac{C_{fe}}{\epsilon_a}. \quad (5.55)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. «Печатные схемы сантиметрового диапазона». Сб. статей под ред. В. И. Сушкича. Изд-во иностранной литературы, 1956.
2. «Полосковые системы сверхвысоких частот». Сб. статей под ред. В. И. Сушкича. Изд-во иностранной литературы, 1959.
3. Изюмова Т. Я., Свиридов В. Т. Полые и ленточные радиоволноводы. Госэнергоиздат, 1960.
4. Ассадурьян Ф., Риман Е. Упрощенная теория полосковых волноводов. «Вопросы радиолокационной техники», 1954, № 2 (20).
5. Дьюкс Д. М. Печатные схемы. Пер. с англ. Изд-во иностранной литературы, 1963.
6. Ефимов И. Е. Радиочастотные линии передачи. Изд-во «Советское радио», 1961.
7. Фром В. Характеристики и некоторые приложения узлов из полосковой линии. В сб. статей [1], стр. 36—55.
8. Кон С. Проблемы полосковых передающих линий. В сб. статей [1], стр. 259—277.
9. Кон С. Последние достижения в области полосковых линий. «Зарубежная радиоэлектроника», 1963, № 3, стр. 124—127.
10. Баррет Р. Печатные схемы сантиметровых волн. Исторический обзор. В сб. статей [1], стр. 9—29.
11. Дьюкс Д. Исследование некоторых основных свойств полосковых передающих линий с помощью электролитической ванны. В сб. статей [1], стр. 106—159.
12. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции, формулы, графики, таблицы. Изд-во «Наука», 1964.
13. Бейтс Р. Характеристическое сопротивление экранированной плоской линии. В сб. статей [2], стр. 78—86.
14. Кухаркин Е. С., Сестрорецкий Б. В. Электрическая прочность волноводных устройств. Изд-во «Высшая школа», 1963.

15. Пистолькорс А. А. Антени. Связьиздат, 1947.
16. Кон С. Экранированная связанные полосковая линия. В сб. статей [2], стр. 173—193.
17. Getsinger W. J. Coupled Rectangular Bars Between Parallel Plates. Trans. IRE, 1962, v. MTT-10, № 1.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

СТУПЕНЧАТЫЕ ПЕРЕХОДЫ

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Ступенчатым переходом (рис. 6.1) называют каскадное соединение n отрезков передающей линии («ступенек»), имеющих одинаковую длину l и различные волновые сопротивления $\tilde{\rho}_i$. Число ступенек в переходе на единицу меньше числа скачков волнового сопротивления. Ступеньки предполагаются не имеющими активных потерь.

Ступенчатые переходы используются:

а) для согласования двух передающих линий с волновыми сопротивлениями $\tilde{\rho}_0$ и r [1—5];

б) в качестве прототипных схем при синтезе других фидерных систем (например, фильтров с непосредственными связями и направленных ответвителей [6—8]).

Под структурой перехода понимают распределение волновых сопротивлений ступенек ($\tilde{\rho}_1, \tilde{\rho}_2, \dots, \tilde{\rho}_n$).

Ниже используются:

— приведенные волновые сопротивления

$$\rho_0 = 1, \dots, \rho_i = \frac{\tilde{\rho}_i}{\tilde{\rho}_0}, \dots, \rho_n = \frac{\tilde{\rho}_n}{\tilde{\rho}_0} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (6.1)$$

отнесенные к волновому сопротивлению в левой подводящей линии (рис. 6.1);

— перепад волнового сопротивления

$$R = \frac{r}{\rho_0} \quad (6.2)$$

— отношение волновых сопротивлений подводящих линий;

— длина ступенек (l) и длина перехода

$$l_0 = nl. \quad (6.3)$$

Частотной характеристикой перехода называют зависимость функций рабочего затухания от θ , эта зависимость всегда полиномиальна [5]

$$L = 1 + P^2(\cos \theta), \quad (6.4)$$

где $P(\cos \theta)$ — четный, либо нечетный полином;

$$\theta = \frac{2\pi l}{\Lambda}, \quad (6.5)$$

Λ — длина волны в передающей линии.

Примерный вид функции (6.4) изображен на рис. 6.2; практически используется лишь первая полоса пропускания (область между θ_n и θ_{-n}).

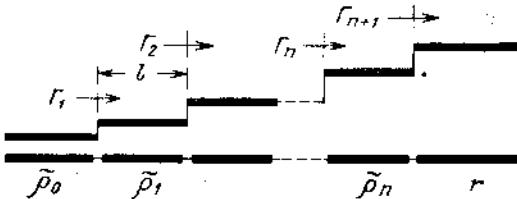


Рис. 6.1. Ступенчатый переход:

$\tilde{\rho}_0, \tilde{\rho}_1, \dots, \tilde{\rho}_n, r$ — волновые сопротивления; $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n, \Gamma_{n+1}$ — местные коэффициенты отражения.

Обычно применяются две разновидности полиномов $P(\cos \theta)$ — чебышевские полиномы и полиномы Баттерворса (максимально плоские частотные характеристики).

Форма частотных характеристик, описываемых (6.4), определяется следующими параметрами:

— полосой пропускания

$$W_n = 2 \frac{\theta_n - \theta_{-n}}{\theta_n + \theta_{-n}} = 2 \frac{\Lambda_{-n} - \Lambda_n}{\Lambda_{-n} + \Lambda_n} = 2 \frac{\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n} - 1}{\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n} + 1} \quad (6.6)$$

(обозначения ясны из рис. 6.2); если нет дисперсии, то (6.6) приводится к виду

$$W_n = 2 \frac{f_n - f_{-n}}{f_n + f_{-n}} \approx \frac{2\Delta f_n}{f_0}. \quad (6.7)$$

Применяется также коэффициент перекрытия диапазона

$$\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n} = \frac{1 + \frac{W_n}{2}}{1 - \frac{W_n}{2}}; \quad (6.8)$$

— допуском на рассогласование ($|\Gamma|_{\max}$) — наибольшим допустимым значением коэффициента отражения в полосе пропускания;
— допустимым затуханием в полосе пропускания (вследствие отражения)

$$b_n = 10 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma|_{\max}^2}; \quad (6.9)$$

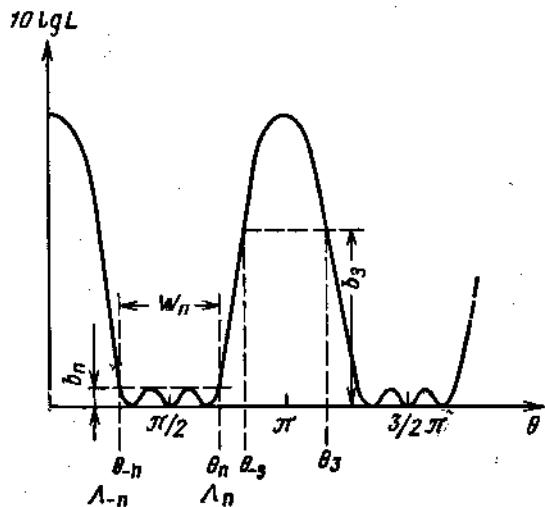


Рис. 6.2. Типичная зависимость рабочего затухания перехода от угла θ .

— полосой заграждения

$$W_3 = 2 \frac{\theta_3 - \theta_{-3}}{\theta_3 + \theta_{-3}} = 2 \frac{\Lambda_{-3} - \Lambda_3}{\Lambda_{-3} + \Lambda_3}; \quad (6.10)$$

— уровнем заграждения

$$b_3 = 10 \lg L_3 \quad (6.11)$$

(обозначения ясны из рис. 6.2).

Параметры W_3 и b_3 относятся к случаю использования ступенчатого перехода в качестве прототипной схемы фильтра.

Если ступенчатый переход применяется для согласования двух передающих линий, то должны быть заданы: перепад волнового

сопротивления R , коэффициент перекрытия $\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n}$ (либо полоса пропускания W_n), допуск на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$.

Если ступенчатые переходы используются для расчета фильтров, то должны быть заданы: полоса пропускания W_n , допуск на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$ (или $b_n = 10 \lg L_n$), полоса заграждения W_3 , затухание в полосе заграждения $b_3 = 10 \lg L_3$.

В обоих случаях искомыми являются: число ступенек, их длина и волновые сопротивления. Методика расчета различная. Ниже рассматриваются переходы как согласующие устройства. Переходы, служащие прототипами фильтров, описаны в гл. 9.

6.2. ЧЕБЫШЕВСКИЕ ПЕРЕХОДЫ

Ступенчатый переход называется чебышевским, если его функция рабочего затухания имеет вид

$$L = 1 + h^2 T_n^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right), \quad (6.12)$$

где n — число ступенек;

$T_n \left(\frac{\cos \theta}{S} \right)$ — полином Чебышева первого рода n -го порядка;

h — амплитудный множитель, нормирующий частотную характеристику в полосе пропускания, связанный с допуском на рассогласование соотношением

$$h = \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}}; \quad (6.13)$$

S — масштабный множитель, нормирующий характеристику по оси частот.

Типичная чебышевская частотная характеристика, описываемая (6.12), изображена на рис. 6.3. Допуск на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$ (затухание b_n) достигается в полосе пропускания $(n+1)$ раз. В переходе с максимально плоской частотной характеристикой (см. § 6.3) допуск на рассогласование достигается лишь на краях полосы пропускания, т. е. только два раза. Таким образом, заданные технические условия в чебышевских переходах реализуются более экономным образом, что и определяет их оптимальность.

Расчетные соотношения для чебышевского перехода имеют вид:

1. Перекрытие диапазона

$$\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n} = \frac{\pi - \arccos S}{\arccos S}, \quad (6.14)$$

где

$$\frac{1}{S} = \operatorname{ch} \frac{1}{n} \operatorname{Ar ch} \left\{ \frac{R-1}{2\sqrt{R}} \frac{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}}{|\Gamma|_{\max}} \right\}. \quad (6.15)$$

2. Длина перехода

$$l_0 = nl = n \frac{\lambda_{\text{--n}}}{2\pi} \arccos S, \quad (6.16)$$

где S рассчитывается согласно (6.15).

3. Волновые сопротивления ступенек [3, 5].
при $n = 2$

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \sqrt{\frac{R-1}{2\left(\frac{2}{S^2}-1\right)} + \sqrt{\frac{(R-1)^2}{4\left(\frac{2}{S^2}-1\right)^2} + R}}, \\ \rho_2 &= \frac{R}{\rho_1}, \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

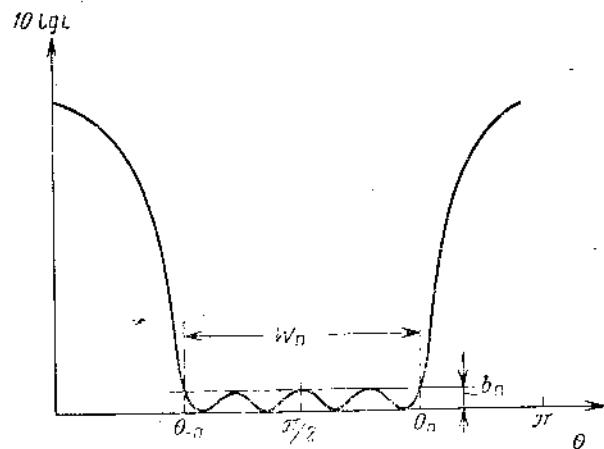


Рис. 6.3. Чебышевская частотная характеристика ступенчатого перехода.

S вычисляется с помощью (6.15);
при $n = 3$ ρ_1 определяется из уравнения

$$\frac{R-1}{\frac{4}{3}\frac{1}{S^2}-1} = \rho_1^2 + 2\rho_1 V\bar{R} - \frac{R}{\rho_1^2} - \frac{2\sqrt{R}}{\rho_1}. \quad (6.18)$$

Другие волновые сопротивления ступенек рассчитываются по формулам

$$\left. \begin{aligned} \rho_2 &= \sqrt{R}, \\ \rho_3 &= \frac{R}{\rho_1}; \end{aligned} \right\} \quad (6.19)$$

при $n = 4$

$$\rho_1 = \sqrt{\xi}, \quad (6.20)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \xi &= -\frac{1}{2} \left\{ \frac{2\sqrt{a}(a-R)}{(V\sqrt{a}+R)^2} - \frac{a^2-R^2}{R(V\sqrt{a}+R)^2} (\tg^2 \theta_1 + \tg^2 \theta_2) \right\} + \\ &+ \sqrt{\frac{1}{4} \left\{ \frac{2\sqrt{a}(a-R)}{(V\sqrt{a}+R)^2} - \frac{a^2-R^2}{R(V\sqrt{a}+R)^2} (\tg^2 \theta_1 + \tg^2 \theta_2) \right\}^2 + \frac{a}{R}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

при этом

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{(R-1)R}{2\tg^2 \theta_1 \tg^2 \theta_2} + \sqrt{\frac{R^2(R-1)^2}{4\tg^4 \theta_1 \tg^4 \theta_2} + R^2}; \\ \cos \theta_1 &= S \cos \frac{\pi}{8}; \\ \cos \theta_2 &= S \cos \frac{3\pi}{8}. \end{aligned} \right\} \quad (6.22)$$

Волновые сопротивления остальных трех ступенек определяются согласно выражений

$$\left. \begin{aligned} \rho_3 &= \frac{\sqrt{a}}{\rho_1}, \\ \rho_2 &= \frac{R}{\rho_3}, \\ \rho_4 &= \frac{R}{\rho_1}. \end{aligned} \right\} \quad (6.23)$$

Для $n > 4$ не существует точных расчетных формул; в этом случае волновые сопротивления ступенек определяются либо с помощью общего метода синтеза [4, 5], либо используются приближенные соотношения [1, 5] (см. § 6.4).

Во всех случаях, когда ступенчатые переходы представляют собой антиметричные четырехполюсники (например, чебышевские переходы, переходы с максимально плоской частотной характеристикой), волновые сопротивления ступенек связаны соотношением

$$\rho_i \rho_{n+1-i} = R \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (6.24)$$

Дополнительные соотношения, используемые при проектировании чебышевских ступенчатых переходов:

1. Число ступенек

10*

где

$$n = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\operatorname{Ar ch} C}{\operatorname{Ar ch} \left(\frac{1}{S} \right)}, \\ C = \frac{R - 1}{2h \sqrt{R}}. \end{array} \right. \quad (6.25)$$

2. Графичные длины воли

$$\left. \begin{array}{l} A_n = \frac{2\pi l}{\pi - \operatorname{arc cos} S}, \\ A_{-n} = \frac{2\pi l}{\operatorname{arc cos} S}. \end{array} \right\} \quad (6.26)$$

3. Длина ступеньки

$$l = \frac{A_n A_{-n}}{2(A_n + A_{-n})} = \frac{A_0}{4}. \quad (6.27)$$

4. Связь между полосой пропускания и масштабным множителем

$$\left. \begin{array}{l} W_n = \frac{4}{\pi} \operatorname{arc sin} S, \\ S = \sin \left(\frac{\pi W_n}{4} \right). \end{array} \right\} \quad (6.28)$$

6.3. ПЕРЕХОДЫ С МАКСИМАЛЬНО ПЛОСКОЙ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Свойства ступенчатых переходов с максимально плоской частотной характеристикой описываются функцией рабочего затухания вида

$$L = 1 + Q^{2n} \cos^{2n} \theta, \quad (6.29)$$

где n — число ступенек;

Q — добротность перехода, определенная по уровню рабочего затухания 3 дБ.

Примерный вид частотной характеристики, рассчитанной с помощью (6.29), показан на рис. 6.4.

При расчете частотной характеристики чебышевского ступенчатого перехода используются три свободных параметра (h , S и n). Свойства переходов с максимально плоской частотной характеристикой определяются двумя параметрами (Q и n), что накладывает определенные ограничения, а именно: допуск на рассогласование в перекрытие диапазона (полоса пропускания) здесь жестко связаны между собой.

В тех случаях, когда переход с максимально плоской частотной характеристикой используется в качестве прототипной схемы фильтра, удобнее пользоваться выражением

$$L = 1 + h^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right)^{2n}, \quad (6.30)$$

где h и S — амплитудный и масштабный множители; они имеют тот же смысл, как в случае чебышевского ступенчатого перехода.

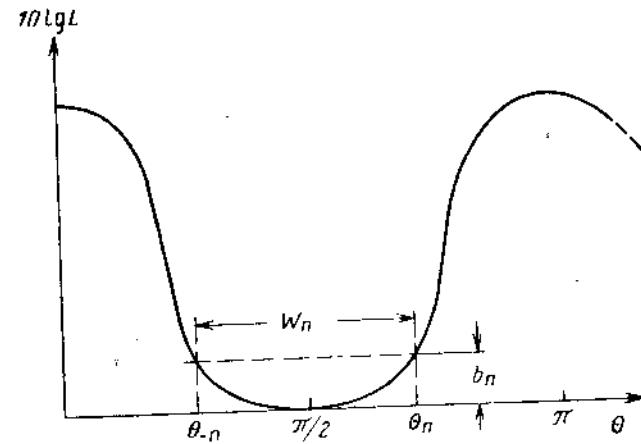


Рис. 6.4. Максимально плоская частотная характеристика.

Множители h и S связаны с добротностью Q выражением

$$Q = \frac{\sqrt[n]{h}}{S}. \quad (6.31)$$

и расчет перехода может быть построен аналогично тому, как это делалось в случае чебышевского ступенчатого перехода. Связь между b_n , h и $|\Gamma|_{\max}$ сохраняется прежней [см. (6.9) и (6.13)].

Переход с максимально плоской частотной характеристикой при тех же значениях R , $|\Gamma|_{\max}$ и W_n имеет большую длину по сравнению с чебышевским переходом.

Преимуществом перехода с максимально плоской частотной характеристикой является достаточно линейная фазо-частотная характеристика. При этом в полосе пропускания активная составляющая входного сопротивления перехода оказывается близкой к постоянной величине, а реактивная — к нулю [9].

Основные расчетные соотношения имеют вид:

1. Перекрытие диапазона

$$\frac{A_{n-1}}{A_n} = \frac{1 + \frac{W_n}{2}}{1 - \frac{W_n}{2}}, \quad (6.32)$$

где

$$W_n = \frac{4}{\pi} \arcsin \left\{ \frac{4R \left(\frac{|\Gamma|_{\max}^2}{1 - |\Gamma|_{\max}^2} \right)}{(R-1)^2} \right\}^{\frac{1}{2n}}. \quad (6.33)$$

2. Длина перехода

$$l_0 = nl = n \frac{A_{n-1}}{2\pi} \arccos \sqrt{\frac{2\sqrt{R}}{R-1} \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}}}. \quad (6.34)$$

3. Волновые сопротивления ступенек [3, 5, 8]:

при $n = 2$

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{R}, \\ \rho_2 = \rho_1 \sqrt{R}; \end{cases} \quad (6.35)$$

при $n = 3$; ρ_1 определяется из уравнения

$$\rho_1^2 + 2\rho_1 \sqrt{R} - \frac{R}{\rho_1^2} - \frac{2\sqrt{R}}{\rho_1} = 0. \quad (6.36)$$

Оставшиеся два волновых сопротивления ступенек рассчитываются по формулам

$$\begin{cases} \rho_2 = \sqrt{R}, \\ \rho_3 = \frac{R}{\rho_1}; \end{cases} \quad (6.37)$$

при $n = 4$

$$\begin{cases} \rho_1 = A \sqrt{R}, & \rho_2 = \rho_1 \sqrt[4]{R}, \\ \rho_3 = \rho_2 \frac{\sqrt[4]{R}}{A^2}, & \rho_4 = \frac{R}{\rho_1}. \end{cases} \quad (6.38)$$

где A вычисляется с помощью уравнения

$$\frac{1}{A^2} - A^2 = 2 \frac{\sqrt{R} - 1}{\sqrt{R} + 1}. \quad (6.39)$$

Заметим, что соотношения между волновыми сопротивлениями перехода с максимально плоской частотной характеристики

(6.35) — (6.39) не зависят от допуска на согласование и могут быть получены из (6.17) — (6.23), если положить в последних $S = 0$.

При $n > 4$ точных расчетных формул нет, в этих случаях используется общий метод синтеза [5] либо приближенные соотношения (см. § 6.4). Соотношение (6.24) между волновыми сопротивлениями ступенек сохраняется.

На рис. 6.5 дана сравнительная оценка полос пропускания переходов с максимально плоской и чебышевской частотными ха-

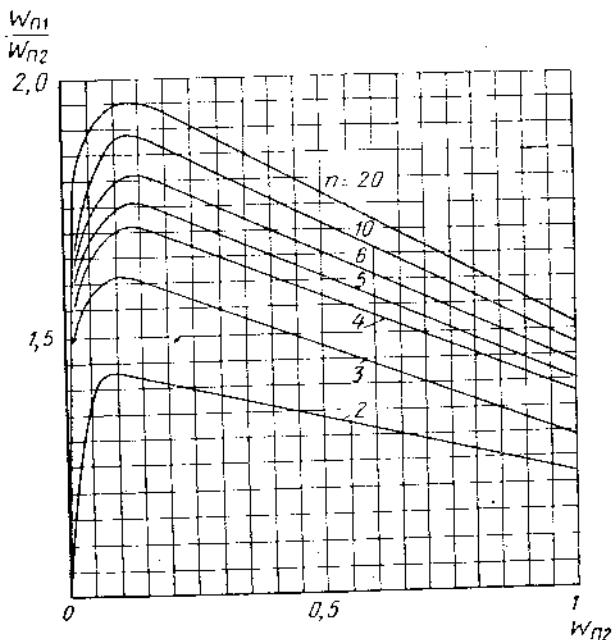


Рис. 6.5. Сравнительная оценка полос пропускания переходов двух типов:

W_{n1} — полоса пропускания чебышевского перехода; W_{n2} — полоса пропускания перехода с максимально плоской частотной характеристикой.

рактеристиками при одинаковых значениях n , R и $|\Gamma|_{\max}$. При малых значениях полосы пропускания (что соответствует большим перепадам R) чебышевский переход примерно в 1,5 раза шире полосы перехода с максимально плоской частотной характеристикой [3, 5]. В табл. 6.1 и 6.2 приводятся численные значения n , необходимые для согласования заданных R при допуске $|\Gamma|_{\max}$ и полосе W_n с помощью переходов двух типов¹.

¹ При использовании таблицы на практике следует число n округлять до ближайшего большего целого числа.

Необходимое число ступенек переходов двух типов

R	1,2		2		3		4		5	
W_n	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2
0,1	1,111	1,141	1,529	1,673	1,681	1,865	1,762	1,968	1,816	2,037
0,2	1,414	1,565	1,947	2,295	2,140	2,559	2,243	2,700	2,313	2,795
0,3	1,685	1,996	2,320	2,927	2,550	3,264	2,672	3,444	2,755	3,565
0,4	1,951	2,473	2,687	3,626	2,953	4,043	3,095	4,266	3,190	4,416
0,5	2,227	3,023	3,066	4,433	3,369	4,944	3,531	5,216	5,399	5,399
0,6	2,521	3,678	3,470	5,592	3,814	6,013	3,997	6,345	4,121	6,568
0,7	2,841	4,474	3,912	6,560	4,299	7,315	4,509	7,718	4,645	7,990
0,8	3,199	5,465	4,404	8,013	4,840	8,936	5,073	9,429	5,230	9,760
0,9	3,607	6,729	4,965	9,866	5,457	11,002	5,779	11,608	5,896	12,016
1,0	4,081	8,380	5,618	12,287	6,174	13,702	6,471	14,457	6,671	14,965

R	6		7		8		9		10	
W_n	n_1	n_2								
0,1	1,857	2,089	1,889	2,131	1,916	2,165	1,939	2,194	1,960	2,246
0,2	2,364	2,867	2,406	2,923	2,440	2,970	2,470	2,942	2,495	3,226
0,3	2,817	3,655	2,866	3,728	2,907	3,798	3,407	3,839	2,292	3,864
0,4	3,262	4,529	3,319	4,618	3,367	4,683	3,888	4,756	3,442	4,812
0,5	3,722	5,537	3,787	5,646	3,842	5,737	4,400	5,815	3,928	5,883
0,6	4,213	6,735	4,287	6,868	4,348	6,979	4,490	7,073	4,446	7,156
0,7	4,749	8,193	4,832	8,355	4,901	8,490	4,960	8,605	5,012	8,705
0,8	5,347	10,008	5,441	10,207	5,519	10,371	5,585	10,611	5,642	10,634
0,9	6,028	12,322	6,134	12,665	6,222	12,768	6,296	12,911	6,362	13,092
1,0	6,821	15,346	6,940	15,650	7,039	15,902	7,124	16,117	7,198	16,305

Приложение к табл. 6.1

R	11		12		13		14		15	
W_n	n_1	n_2								
0,1	1,977	2,242	1,993	2,263	2,008	2,281	2,021	2,298	2,033	2,314
0,2	2,518	3,077	2,538	3,105	2,557	3,130	2,574	3,153	2,589	3,175
0,3	2,999	3,924	3,024	3,959	3,046	3,991	3,066	4,021	3,084	4,048
0,4	3,474	4,861	3,502	4,905	3,527	4,945	3,551	4,981	3,572	5,015
0,5	3,964	5,943	3,996	5,997	4,025	6,046	4,052	6,090	4,076	6,132
0,6	4,486	7,299	4,523	7,294	4,556	7,354	4,686	7,408	4,614	7,458
0,7	5,057	8,794	5,098	8,874	5,135	8,946	5,169	9,012	5,201	9,073
0,8	5,694	10,743	5,740	10,840	5,782	10,928	5,820	11,009	5,856	11,084
0,9	6,420	13,226	6,472	13,345	6,519	13,454	6,562	13,554	6,601	13,646
1,0	7,263	16,472	7,322	16,621	7,375	16,757	7,424	16,881	7,469	16,995

R	16		17		18		19		20	
W_n	n_1	n_2								
0,1	2,045	2,328	2,055	2,342	2,065	2,354	2,075	2,366	2,083	2,377
0,2	2,604	3,194	2,617	3,213	2,630	3,230	2,642	3,246	2,653	3,252
0,3	3,102	4,074	3,118	4,097	3,133	4,119	3,147	4,140	3,160	4,159
0,4	3,392	5,046	3,611	5,076	3,628	5,103	3,644	5,129	3,660	5,163
0,5	4,099	6,170	4,120	6,205	4,140	6,239	4,159	6,270	4,176	6,300
0,6	4,639	7,505	4,663	7,548	4,686	7,589	4,707	7,627	4,727	7,663
0,7	5,230	9,130	5,257	9,183	5,282	9,232	5,306	9,279	5,328	9,322
0,8	5,888	11,153	5,919	11,217	5,947	11,278	5,974	11,334	5,999	11,388
0,9	6,638	13,731	6,673	13,810	6,705	13,884	6,735	13,954	6,763	14,020
1,0	7,511	17,101	7,549	17,200	7,586	17,292	7,620	17,379	7,662	17,461

10B. Зад. 782

Продолжение табл. 6.1

R	21			22			23			24			25			
W_{Π}	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	
0,1	2,092	2,388	2,100	2,398	2,107	2,407	2,114	2,416	2,121	2,426	2,121	2,425	2,121	2,425	2,121	2,425
0,2	2,663	3,276	2,673	3,290	2,683	3,303	2,692	3,316	2,701	3,327	2,701	3,327	2,701	3,327	2,701	3,327
0,3	3,173	4,178	3,185	4,195	3,196	4,212	3,207	4,228	3,217	4,243	3,217	4,243	3,217	4,243	3,217	4,243
0,4	3,674	5,176	3,688	5,197	3,701	5,218	3,714	5,238	3,726	5,257	3,726	5,257	3,726	5,257	3,726	5,257
0,5	4,193	6,398	4,209	6,354	4,224	6,380	4,238	6,404	4,252	6,427	4,252	6,427	4,252	6,427	4,252	6,427
0,6	4,746	7,697	4,764	7,729	4,781	7,760	4,797	7,790	4,812	7,818	4,812	7,818	4,812	7,818	4,812	7,818
0,7	5,350	9,364	5,370	9,403	5,389	9,440	5,407	9,476	5,425	9,510	5,425	9,510	5,425	9,510	5,425	9,510
0,8	6,023	11,439	6,046	11,487	6,068	11,532	6,088	11,576	6,108	11,618	6,108	11,618	6,108	11,618	6,108	11,618
0,9	6,790	14,082	6,816	14,142	6,840	14,198	6,864	14,251	6,886	14,303	6,886	14,303	6,886	14,303	6,886	14,303
1,0	7,683	17,539	7,712	17,612	7,739	17,682	7,786	17,749	7,791	17,813	7,791	17,813	7,791	17,813	7,791	17,813

R	26			27			28			29			30			
W_{Π}	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	
0,1	2,128	2,434	2,134	2,442	2,140	2,449	2,146	2,457	2,151	2,464	2,151	2,464	2,151	2,464	2,151	2,464
0,2	2,709	3,339	2,717	3,350	2,725	3,360	2,732	3,371	2,739	3,380	2,739	3,380	2,739	3,380	2,739	3,380
0,3	3,227	4,258	3,237	4,272	3,249	4,285	3,255	4,298	3,263	4,311	3,263	4,311	3,263	4,311	3,263	4,311
0,4	3,738	5,275	3,749	5,292	3,759	5,309	3,769	5,325	3,779	5,340	3,779	5,340	3,779	5,340	3,779	5,340
0,5	4,265	6,449	4,277	6,470	4,290	6,490	4,301	6,510	4,312	6,529	4,312	6,529	4,312	6,529	4,312	6,529
0,6	4,827	7,844	4,841	7,870	4,855	7,895	4,868	7,919	4,881	7,942	4,881	7,942	4,881	7,942	4,881	7,942
0,7	5,441	9,543	5,458	9,574	5,473	9,604	5,488	9,633	5,502	9,661	5,502	9,661	5,502	9,661	5,502	9,661
0,8	6,127	11,657	6,145	11,695	6,162	11,730	6,179	11,768	6,195	11,802	6,195	11,802	6,195	11,802	6,195	11,802
0,9	6,907	14,352	6,928	14,399	6,947	14,444	6,966	14,488	6,984	14,530	6,984	14,530	6,984	14,530	6,984	14,530
1,0	7,815	17,874	7,838	17,933	7,860	17,990	7,881	18,044	7,902	18,096	7,902	18,096	7,902	18,096	7,902	18,096

Продолжение табл. 6.1

R	40			50			60			70			80			
W_{Π}	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	
0,1	2,199	2,524	2,234	2,569	2,264	2,607	2,288	2,638	2,309	2,665	2,309	2,665	2,309	2,665	2,309	2,665
0,2	2,799	3,463	2,845	3,525	2,882	3,576	2,914	3,619	2,941	3,656	2,941	3,656	2,941	3,656	2,941	3,656
0,3	3,335	4,415	3,389	4,496	3,434	4,561	3,471	4,615	3,503	4,662	3,503	4,662	3,503	4,662	3,503	4,662
0,4	3,882	5,470	3,925	5,569	3,977	5,660	4,020	5,718	4,057	5,776	4,057	5,776	4,057	5,776	4,057	5,776
0,5	4,407	6,688	4,479	6,809	4,538	6,908	4,587	6,990	4,620	7,062	4,620	7,062	4,620	7,062	4,620	7,062
0,6	4,988	8,135	5,070	8,283	5,136	8,402	5,192	8,503	5,240	8,590	5,240	8,590	5,240	8,590	5,240	8,590
0,7	5,623	9,896	5,715	10,076	5,790	10,222	5,852	10,344	5,906	10,450	5,906	10,450	5,906	10,450	5,906	10,450
0,8	6,331	12,089	6,435	12,309	6,519	12,487	6,589	12,636	6,650	12,765	6,650	12,765	6,650	12,765	6,650	12,765
0,9	7,137	14,883	7,254	15,154	7,349	15,373	7,429	15,557	7,497	15,716	7,497	15,716	7,497	15,716	7,497	15,716
1,0	8,075	18,536	8,207	18,873	8,315	19,146	8,405	19,375	8,483	19,533	8,483	19,533	8,483	19,533	8,483	19,533

Продолжение табл. 6.1

R	90			100			200			300			400			
W_{Π}	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	
0,1	2,328	2,688	2,345	2,710	2,453	2,848	2,516	2,928	2,561	2,955	2,561	2,955	2,561	2,955	2,561	2,955
0,2	2,964	3,689	2,986	3,718	3,124	3,907	3,204	3,997	3,261	4,017	3,261	4,017	3,261	4,017	3,261	4,017
0,3	3,531	4,704	3,557	4,741	4,873	4,982	3,817	5,123	3,885	5,222	3,885	5,222	3,885	5,222	3,885	5,222
0,4	4,090	5,827	4,119	5,873	4,310	6,172	4,421	6,347	4,499	6,470	4,499	6,470	6,470	6,470	6,470	6,470
0,5	4,667	7,124	4,700	7,181	4,918	7,547	5,044	7,759	5,134	7,910	5,134	7,910	5,134	7,910	5,134	7,910
0,6	5,282	8,666	5,320	8,734	5,566	9,180	5,709	9,438	5,811	9,622	5,811	9,622	5,811	9,622	5,811	9,622
0,7	5,954	10,543	5,997	10,626	6,274	11,167	6,436	11,482	6,550	11,705	6,550	11,705	6,550	11,705	6,550	11,705
0,8	6,704	12,879	6,762	12,980	7,065	13,642	7,246	14,026	7,375	14,298	7,375	14,298	7,375	14,298	7,375	14,298
0,9	7,558	15,855	7,612	15,980	7,964	16,795	8,169	17,263	8,355	17,603	8,355	17,603	8,355	17,603	8,355	17,603
1,0	8,551	19,747	8,612	19,902	9,011	20,917	9,243	21,506	9,407	21,924	9,407	21,924	9,407	21,924	9,407	21,924

Продолжение табл. 6.1

R	500		600		700		800		900	
	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2
0,1	2,596	3,029	2,624	3,065	2,648	3,095	2,669	3,122	2,687	3,145
0,2	3,305	4,156	3,341	4,205	3,372	4,247	3,398	4,283	3,421	4,315
0,3	3,937	5,299	3,980	5,362	4,016	5,415	4,048	5,462	4,076	5,502
0,4	4,560	6,565	4,610	6,643	4,652	6,709	4,688	6,766	4,720	6,816
0,5	5,203	8,027	5,260	8,122	5,308	8,202	5,349	8,272	5,389	8,334
0,6	5,889	9,764	5,954	9,879	6,008	9,977	6,065,	10,062	6,092	10,137
0,7	6,639	11,878	6,711	12,019	6,772	12,138	6,825	12,241	6,872	12,332
0,8	7,475	14,509	7,556	14,682	7,625	14,827	7,685	14,953	7,737	15,064
0,9	8,427	17,863	8,519	18,075	8,596	18,254	8,663	18,409	8,723	18,546
1,0	9,534	22,247	9,638	22,511	9,726	22,734	9,802	22,927	9,869	23,098

R	1000		2000		3000		4000		5000	
	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2
0,1	2,703	3,165	2,810	3,302	2,873	3,382	2,918	3,438	2,952	3,482
0,2	3,442	4,343	3,579	4,530	3,658	4,640	3,715	4,717	3,759	4,777
0,3	4,100	5,538	4,263	5,777	4,358	5,916	4,425	6,015	4,478	6,092
0,4	4,749	6,861	4,937	7,157	5,047	7,329	5,25	7,452	5,186	7,547
0,5	5,419	8,389	5,633	8,750	5,759	8,961	5,848	9,111	5,917	9,227
0,6	6,133	10,304	6,376	10,643	6,518	10,900	6,619	11,082	6,698	11,224
0,7	6,913	12,413	7,188	12,948	7,348	13,260	7,462	13,482	7,550	13,654
0,8	7,784	15,163	8,093	15,817	8,273	16,198	8,401	16,469	8,501	16,679
0,9	8,775	18,668	9,124	19,472	9,327	19,942	9,471	20,276	9,583	20,534
1,0	9,929	23,250	10,322	24,252	10,553	24,837	10,716	25,552	10,842	25,574

Продолжение табл. 6.1

R	6000		7000		8000		9000	
	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2
0,1	2,980	3,518	3,004	3,548	3,025	3,574	3,043	3,597
0,2	3,795	4,827	3,825	4,868	3,861	4,904	3,875	4,936
0,3	4,520	6,165	4,557	6,208	4,588	6,254	4,615	6,294
0,4	5,235	7,625	5,277	7,690	5,313	7,747	5,345	7,797
0,5	5,974	9,322	6,022	9,402	6,063	9,472	6,099	9,533
0,6	6,761	11,339	6,819	11,437	6,862	11,521	6,904	11,596
0,7	7,622	13,794	7,683	13,913	7,735	14,016	7,782	14,107
0,8	8,582	16,851	8,659	16,996	8,710	17,122	8,762	17,233
0,9	9,675	20,746	9,752	20,924	9,819	21,079	9,878	21,216
1,0	10,946	25,837	11,033	26,060	11,109	26,253	11,176	26,423

R	10000		20000		30000		40000		50000	
	n_1	n_2								
0,1	3,059	3,618	3,156	3,754	3,229	3,834	3,273	3,891	3,308	3,934
0,2	3,895	4,964	4,032	5,151	4,111	5,260	4,168	5,338	4,212	5,398
0,3	4,640	6,330	4,803	6,569	4,898	6,708	4,965	6,807	5,017	6,884
0,4	5,374	7,842	5,562	8,137	5,672	8,310	5,750	8,433	5,811	8,528
0,5	6,132	9,588	6,347	9,949	6,472	10,190	6,561	10,310	6,630	10,426
0,6	6,941	11,663	7,183	12,102	7,326	12,358	7,426	12,541	7,505	12,682
0,7	7,824	14,188	8,097	14,722	8,258	15,034	8,377	15,256	8,459	15,428
0,8	8,809	17,332	9,117	17,984	9,298	18,365	9,426	18,636	9,525	18,843
0,9	9,931	21,338	10,279	22,141	10,482	22,610	10,626	22,944	10,738	23,202
1,0	11,236	26,575	11,629	27,575	11,859	28,160	12,022	28,575	12,149	28,897

R	60000			70000			80000			90000			100000			
	W _n	n ₁	n ₂													
0,1	3,336	3,970	3,360	4,001	3,380	4,027	3,399	4,050	3,415	4,071						
0,2	4,248	5,447	4,278	5,489	4,304	5,525	4,327	5,557	4,348	5,585						
0,3	5,060	6,946	5,096	6,999	5,127	7,045	5,155	7,089	5,180	7,122						
0,4	5,860	8,605	5,902	8,671	5,938	8,728	5,970	8,778	5,999	8,823						
0,5	6,687	10,521	6,735	10,601	6,776	10,671	6,812	10,732	6,845	10,787						
0,6	7,568	12,797	7,623	12,695	7,669	12,980	7,711	13,054	7,748	13,121						
0,7	8,532	15,568	8,592	15,687	8,645	15,790	8,692	15,881	8,733	15,962						
0,8	9,606	19,018	9,675	19,103	9,734	19,288	9,786	19,399	9,833	19,496						
0,9	10,829	23,413	10,907	23,592	10,974	23,747	11,033	23,883	11,086	24,006						
1,0	12,252	29,190	12,340	29,382	12,416	29,575	12,482	29,745	12,542	29,897						

Таблица 6.2

Необходимое число ступенек переходов двух типов

 $\Gamma_{\max} = 0,05$

R	1,2			2			3			4			5			
	W _n	n ₁	n ₂													
0,1	0,373	0,236	0,816	0,768	0,968	1,050	1,063	1,104	1,132							
0,2	0,455	0,323	1,039	1,053	1,233	1,318	1,337	1,406	1,554							
0,3	0,566	0,412	1,234	1,343	1,469	1,680	1,592	1,860	1,675	1,981						
0,4	0,655	0,511	1,434	1,664	1,702	2,082	1,844	2,304	1,940	2,454						
0,5	0,748	0,625	1,636	2,035	1,942	2,515	2,104	2,817	2,213	3,001						
0,6	0,846	0,760	1,852	2,475	2,198	3,096	2,382	3,427	2,505	3,650						
0,7	0,954	0,925	2,087	3,011	2,477	3,766	2,685	4,169	2,824	4,441						
0,8	1,074	1,130	2,350	3,678	2,789	4,601	3,023	5,093	3,180	5,425						
0,9	1,211	1,391	2,650	4,528	3,145	5,664	3,408	6,271	3,585	6,679						
1,0	1,371	1,733	2,998	5,640	3,558	7,055	3,856	7,810	4,056	8,318						

R	6			7			8			9			10			
	W _n	n ₁	n ₂													
0,1	1,145	1,184	1,177	1,225	1,204	1,260	1,228	1,289	1,248							
0,2	1,458	1,625	1,499	1,681	1,534	1,729	1,563	1,769	1,589	1,804						
0,3	1,737	2,072	1,786	2,144	1,827	2,204	1,862	2,256	1,893	2,300						
0,4	2,011	2,567	2,069	2,656	2,116	2,731	2,157	2,794	2,192	2,850						
0,5	2,295	3,138	2,361	3,248	2,415	3,339	2,461	3,416	2,501	3,484						
0,6	2,598	3,817	2,672	3,951	2,733	4,061	2,785	4,156	2,831	4,238						
0,7	2,929	4,644	3,012	4,806	3,081	4,941	3,140	5,056	3,191	5,156						
0,8	3,297	5,673	3,391	5,871	3,469	6,036	3,535	6,176	3,593	6,299						
0,9	3,717	6,884	3,823	7,228	3,911	7,431	3,986	7,604	4,051	7,754						
1,0	4,206	8,699	4,325	9,002	4,425	9,254	4,459	9,470	4,583	9,658						

Дополнительные соотношения, используемые при проектировании переходов с максимально плоской характеристикой:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{\lg C_1}{\lg \left\{ \left| \cos \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{W_n}{2} \right) \right| \right\}}, \\ C_1 &= \frac{2 \sqrt{R} |\Gamma|_{\max}}{(R-1) \sqrt{1 + |\Gamma|_{\max}^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (6.40)$$

где

6.4. ПРИБЛИЖЕННАЯ ТЕОРИЯ

Приближенная теория основана на представлениях о геометрическом сложении местных коэффициентов отражения от отдельных ступенек [1, 2, 5]. При выполнении определенных расчетных правил она сохраняет достаточную точность даже при больших перепадах волнового сопротивления [5]; указанные обстоятельства позволили использовать приближенную теорию для расчета некоторой части таблиц в § 6.5.

ПРИБЛИЖЕННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЧЕБЫШЕВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

Четное число ступенек $n = 2N$

$$P_m = h \sum_{q=m}^N \frac{(-1)^{N-q} N(N+q-1)!}{(q-m)!(q+m)!(N-q)!} \left(\frac{1}{S} \right)^{2q} \quad (m = 0, 1, 2, \dots, N), \quad (6.41)$$

где P_m — собственный коэффициент отражения m -й ступеньки, приведенный к центру перехода (рис. 6.6);

$$S = \frac{1}{\operatorname{ch} \left(\frac{1}{n} \operatorname{Ar} \operatorname{ch} \frac{|\Gamma|_R}{|\Gamma|_{\max}} \right)}; \quad (6.42)$$

$$|\Gamma|_R = \frac{1}{2} \ln R; \quad (6.43)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \Gamma_{\frac{n+1}{2}} = P_{\frac{n}{2}}; \\ \Gamma_2 &= \Gamma_n = P_{\frac{n-1}{2}}; \\ \dots &\dots \\ \Gamma_{\frac{n+1}{2}} &= P_0; \end{aligned} \right\} \quad (6.44)$$

где $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{n+1}$ — собственные коэффициенты отражения ступенек, отсчитанные от начала перехода (см. рис. 6.1).

Нечетное число ступенек $n = 2N - 1$:

$$P_m = \frac{h}{2} \sum_{q=m}^N \frac{(-1)^{N-q} (2N-1)(N+q-2)!}{(q-m)!(q-1+m)!(N-q)!} \left(\frac{1}{S} \right)^{2q-1} \quad (m = 1, 2, 3, \dots, N), \quad (6.45)$$

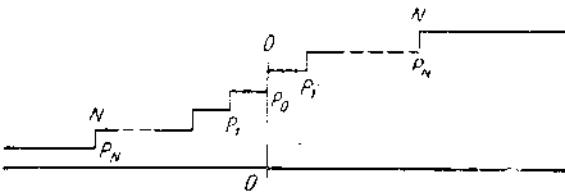


Рис. 6.6. Ступенчатый переход с четным числом ступенек

причем

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \Gamma_{\frac{n+1}{2}} = P_{\frac{n}{2}}; \\ \Gamma_2 &= \Gamma_n = P_{\frac{n-1}{2}}; \\ \dots &\dots \\ \Gamma_{\frac{n+1}{2}} &= P_1. \end{aligned} \right\} \quad (6.46)$$

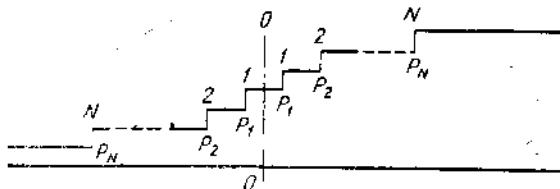


Рис. 6.7. Ступенчатый переход с нечетным числом ступенек

Смысл P_m (см. рис. 6.7) и $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_l$ такой же, как в (6.41) и (6.44).

Частные формулы для местных коэффициентов отражения, полученные из (6.41), (6.44), (6.45) и (6.46) для различных n , приведены ниже:

1) $n = 1$ (четвертьволновая согласующая секция)

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = \frac{1}{2} \frac{h}{S}; \quad (6.47)$$

2) $n = 2$

$$\Gamma_1 = \Gamma_3 = \frac{1}{2} \frac{h}{S^2}, \quad \Gamma_2 = h \left(\frac{1}{S^2} - 1 \right); \quad (6.48)$$

3) $n = 3$

$$\Gamma_1 = \Gamma_4 = \frac{1}{2} \frac{h}{S^3}, \quad \Gamma_2 = \Gamma_3 = \frac{3}{2} h \left(\frac{1}{S^3} - \frac{1}{S} \right); \quad (6.49)$$

4) $n = 4$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_5 &= \frac{1}{2} \frac{h}{S^4}, & \Gamma_2 = \Gamma_4 &= 2h \left(\frac{1}{S^4} - \frac{1}{S^2} \right); \\ \Gamma_3 &= h \left(\frac{3}{S^4} - \frac{4}{S^2} + 1 \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.50)$$

5) $n = 5$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_6 &= \frac{1}{2} \frac{h}{S^5}, \\ \Gamma_2 = \Gamma_5 &= \frac{5}{2} h \left(\frac{1}{S^5} - \frac{1}{S^3} \right), \\ \Gamma_3 = \Gamma_4 &= \frac{1}{2} h \left(\frac{10}{S^5} - \frac{15}{S^3} + \frac{5}{S} \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.51)$$

6) $n = 6$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_7 &= \frac{1}{2} \frac{h}{S^6}, \\ \Gamma_2 = \Gamma_6 &= 3h \left(\frac{1}{S^6} - \frac{1}{S^4} \right), \\ \Gamma_3 = \Gamma_5 &= \frac{h}{2} \left(\frac{15}{S^6} - \frac{24}{S^4} + \frac{9}{S^2} \right), \\ \Gamma_4 &= h \left(\frac{10}{S^6} - \frac{18}{S^4} + \frac{9}{S^2} - 1 \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.52)$$

7) $n = 7$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_8 &= \frac{h}{2} \frac{1}{S^7}, \\ \Gamma_2 = \Gamma_7 &= \frac{h}{2} \left(\frac{7}{S^7} - \frac{7}{S^5} \right), \\ \Gamma_3 = \Gamma_6 &= \frac{h}{2} \left(\frac{21}{S^7} - \frac{35}{S^5} + \frac{14}{S^3} \right), \\ \Gamma_4 = \Gamma_5 &= \frac{h}{2} \left(\frac{35}{S^7} - \frac{70}{S^5} + \frac{42}{S^3} - \frac{7}{S} \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.53)$$

8) $n = 8$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_9 &= \frac{h}{2} \frac{1}{S^8}, \\ \Gamma_2 = \Gamma_8 &= \frac{h}{2} \left(\frac{8}{S^8} - \frac{8}{S^6} \right), \\ \Gamma_3 = \Gamma_7 &= \frac{h}{2} \left(\frac{28}{S^8} - \frac{48}{S^6} + \frac{20}{S^4} \right), \\ \Gamma_4 = \Gamma_6 &= \frac{h}{2} \left(\frac{56}{S^8} - \frac{120}{S^6} + \frac{80}{S^4} - \frac{16}{S^2} \right), \\ \Gamma_5 &= h \left(\frac{35}{S^8} - \frac{80}{S^6} + \frac{60}{S^4} - \frac{16}{S^2} + 1 \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.54)$$

9) $n = 9$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_{10} &= \frac{h}{2} \frac{1}{S^9}, \\ \Gamma_2 = \Gamma_9 &= \frac{h}{2} \left(\frac{9}{S^9} - \frac{9}{S^7} \right), \\ \Gamma_3 = \Gamma_8 &= \frac{h}{2} \left(\frac{36}{S^9} - \frac{63}{S^7} + \frac{27}{S^5} \right), \\ \Gamma_4 = \Gamma_7 &= \frac{h}{2} \left(\frac{84}{S^9} - \frac{189}{S^7} + \frac{135}{S^6} - \frac{30}{S^3} \right), \\ \Gamma_5 = \Gamma_6 &= \frac{h}{2} \left(\frac{126}{S^9} - \frac{315}{S^7} + \frac{270}{S^6} - \frac{90}{S^3} + \frac{9}{S} \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.55)$$

10) $n = 10$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_{11} &= \frac{h}{2} \frac{1}{S^{10}}, \\ \Gamma_2 = \Gamma_{10} &= \frac{h}{2} \left(\frac{10}{S^{10}} - \frac{10}{S^8} \right), \end{aligned} \right\} \quad (6.56)$$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_3 &= \Gamma_9 = \frac{h}{2} \left(\frac{45}{S^{10}} - \frac{80}{S^8} + \frac{35}{S^6} \right), \\ \Gamma_4 &= \Gamma_8 = \frac{h}{2} \left(\frac{120}{S^{10}} - \frac{280}{S^8} + \frac{210}{S^6} - \frac{50}{S^4} \right), \\ \Gamma_5 &= \Gamma_7 = \frac{h}{2} \left(\frac{210}{S^{10}} - \frac{560}{S^8} + \frac{525}{S^6} - \frac{200}{S^4} + \frac{25}{S^2} \right), \\ \Gamma_6 &= h \left(\frac{126}{S^{10}} - \frac{350}{S^8} + \frac{350}{S^6} - \frac{150}{S^4} + \frac{25}{S^2} - 1 \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.56)$$

11) $n = 11$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \Gamma_{12} = \frac{h}{2} \frac{1}{S^{11}}, \\ \Gamma_2 &= \Gamma_{11} = \frac{h}{2} \left(\frac{11}{S^{11}} - \frac{11}{S^9} \right), \\ \Gamma_3 &= \Gamma_{10} = \frac{h}{2} \left(\frac{55}{S^{11}} - \frac{99}{S^9} + \frac{44}{S^7} \right), \\ \Gamma_4 &= \Gamma_9 = \frac{h}{2} \left(\frac{165}{S^{11}} - \frac{396}{S^9} + \frac{308}{S^7} - \frac{77}{S^5} \right), \\ \Gamma_5 &= \Gamma_8 = \frac{h}{2} \left(\frac{330}{S^{11}} - \frac{924}{S^9} + \frac{924}{S^7} - \frac{385}{S^5} + \frac{55}{S^3} \right), \\ \Gamma_6 &= \Gamma_7 = \frac{h}{2} \left(\frac{462}{S^{11}} - \frac{1386}{S^9} + \frac{1540}{S^7} - \frac{770}{S^5} + \frac{65}{S^3} - \frac{11}{S} \right); \end{aligned} \right\} \quad (6.57)$$

12) $n = 12$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \Gamma_{13} = \frac{h}{2} \frac{1}{S^{12}}, \\ \Gamma_2 &= \Gamma_{12} = \frac{h}{2} \left(\frac{12}{S^{12}} - \frac{12}{S^{10}} \right), \\ \Gamma_3 &= \Gamma_{11} = \frac{h}{2} \left(\frac{66}{S^{12}} - \frac{120}{S^{10}} + \frac{54}{S^8} \right), \\ \Gamma_4 &= \Gamma_{10} = \frac{h}{2} \left(\frac{220}{S^{12}} - \frac{540}{S^{10}} + \frac{432}{S^8} - \frac{112}{S^6} \right), \\ \Gamma_5 &= \Gamma_9 = \frac{h}{2} \left(\frac{495}{S^{12}} - \frac{1440}{S^{10}} + \frac{1512}{S^8} - \frac{672}{S^6} + \frac{105}{S^4} \right), \\ \Gamma_6 &= \Gamma_8 = h \left(\frac{998}{S^{12}} - \frac{1260}{S^{10}} + \frac{1510}{S^8} - \frac{840}{S^6} + \frac{210}{S^4} - \frac{18}{S^2} \right), \\ \Gamma_7 &= h \left(\frac{462}{S^{12}} - \frac{1512}{S^{10}} + \frac{1890}{S^8} - \frac{1120}{S^6} + \frac{315}{S^4} - \frac{36}{S^2} + 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (6.58)$$

При $n > 20$ вычисление местных коэффициентов отражения по формулам (6.41) и (6.45) становится затруднительным из-за возникающих в ЭВМ переполнений. В этих случаях оказывается удобной другая форма записи приближенных соотношений [10]:

— четное число ступенек $n = 2N$:

$$P_m = \frac{h}{2N+1} \left\{ T_{2N} \left(\frac{1}{S} \right) + 2 \sum_{a=1}^N T_{2N} \left(\frac{\cos \frac{a\pi}{2N+1}}{S} \right) \cos \left(\frac{a2\pi m}{2N+1} \right) \right\} \quad (6.59)$$

$$(m = 0, 1, 2, 3, \dots, N),$$

где $T_{2N}(x)$ — полином Чебышева первого рода $2N$ -го порядка; P_m и S соответствуют (6.41) и (6.42);— нечетное число ступенек $n = 2N-1$:

$$P_m = \frac{h}{2N} \left\{ T_{2N-1} \left(\frac{1}{S} \right) + 2 \sum_{a=1}^{N-1} T_{2N-1} \left(\frac{\cos \frac{a\pi}{2N}}{S} \right) \cos \left[\frac{a\pi (2m+1)}{2N} \right] \right\} \quad (6.60)$$

 $(m = 1, 2, 3, \dots, N),$ P_m соответствует (6.45).

Другой способ приближенного вычисления местных коэффициентов отражения предложен в [8]:

$$\frac{\Gamma_i}{\Gamma_1} = \frac{n}{n+1-i} \sum_{r=0}^{i-2} \frac{(n+1-i)!(i-2)!}{(r+1)!(n-i-r)!r!(i-2-r)!}, \quad (6.61)$$

где

$$\Gamma_1 = \frac{h}{2} \frac{1}{S^n}. \quad (6.62)$$

Для четного числа ступенек

$$2 \leq i \leq \frac{n}{2} + 1, \quad (6.63)$$

при нечетном числе ступенек

$$2 \leq i \leq \frac{n+1}{2}. \quad (6.64)$$

В работе [5] рекомендован следующий порядок расчета волновых сопротивлений ступенек по приближенным формулам, справедливый для $R = 1 \div 30$:

1) Местные коэффициенты отражения рассчитываются по формулам (6.41), (6.45) или (6.59), (6.60) и (6.61), где S определяется по формуле (6.42).

Расчетные параметры чебышевских переходов |Г|_{макс} = 0,005, n = 2

R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Lambda_{-\Pi}}{\Lambda_\Pi}$	$\frac{t_0}{\Lambda_{-\Pi}}$	R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Lambda_{-\Pi}}{\Lambda_\Pi}$	$\frac{t_0}{\Lambda_{-\Pi}}$
1,2	1,049	1,144	1,528	0,422	5,6	1,542	3,631	1,138	0,468
1,4	1,090	1,284	1,364	0,435	5,8	1,556	3,728	1,136	0,469
1,6	1,127	1,419	1,300	0,442	6,0	1,569	3,824	1,134	0,469
1,8	1,161	1,550	1,263	0,447	6,2	1,582	3,919	1,132	0,469
2,0	1,192	1,678	1,239	0,450	6,4	1,595	4,014	1,131	0,470
2,2	1,221	1,802	1,222	0,452	6,6	1,607	4,108	1,130	0,470
2,4	1,248	1,923	1,209	0,455	6,8	1,619	4,201	1,128	0,470
2,6	1,273	2,042	1,198	0,456	7,0	1,631	4,293	1,127	0,470
2,8	1,297	2,159	1,190	0,458	7,2	1,642	4,385	1,126	0,471
3,0	1,319	2,273	1,183	0,459	7,4	1,653	4,476	1,125	0,471
3,2	1,341	2,387	1,176	0,461	7,6	1,665	4,566	1,123	0,471
3,4	1,361	2,498	1,171	0,462	7,8	1,675	4,656	1,122	0,471
3,6	1,381	2,607	1,166	0,462	8,0	1,686	4,745	1,121	0,472
3,8	1,400	2,715	1,162	0,463	8,2	1,696	4,833	1,120	0,472
4,0	1,418	2,821	1,158	0,464	8,4	1,707	4,922	1,119	0,472
4,2	1,435	2,927	1,155	0,465	8,6	1,717	5,009	1,118	0,472
4,4	1,452	3,030	1,152	0,466	8,8	1,727	5,097	1,117	0,472
4,6	1,468	3,133	1,149	0,466	9,0	1,736	5,183	1,116	0,473
4,8	1,484	3,235	1,147	0,467	9,2	1,746	5,269	1,115	0,473
5,0	1,499	3,335	1,144	0,467	9,4	1,755	5,355	1,114	0,473
5,2	1,514	3,435	1,142	0,467	9,6	1,765	5,440	1,114	0,473
5,4	1,528	3,534	1,140	0,468	9,8	1,774	5,525	1,113	0,473

Приложение табл. 6.3

|Г|_{макс} = 0,005, n = 3

R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Lambda_{-\Pi}}{\Lambda_\Pi}$	$\frac{t_0}{\Lambda_{-\Pi}}$	R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Lambda_{-\Pi}}{\Lambda_\Pi}$	$\frac{t_0}{\Lambda_{-\Pi}}$
1,2	1,039	1,095	1,165	0,470	5,6	1,257	2,366	4,455	1,419
1,4	1,051	1,183	1,331	0,584	5,8	1,263	2,408	4,593	1,415
1,6	1,070	1,265	1,495	0,578	6,0	1,268	2,449	4,731	1,411
1,8	1,086	1,342	1,656	1,685	6,2	1,273	2,490	4,869	1,408
2,0	1,101	1,414	1,816	1,637	6,4	1,279	2,530	5,005	1,404
2,2	1,115	1,483	1,973	1,601	5,77	1,284	2,569	5,142	1,401
2,4	1,128	1,549	2,128	1,574	5,83	1,288	2,603	5,277	1,398
2,6	1,139	1,612	2,282	1,552	5,88	1,293	2,642	5,412	1,395
2,8	1,150	1,673	2,434	1,533	5,92	1,297	2,683	5,547	1,392
3,0	1,161	1,732	2,565	1,518	5,96	1,302	2,720	5,681	1,389
3,2	1,170	1,789	2,734	1,505	5,99	1,307	2,757	5,815	1,386
3,4	1,179	1,844	2,883	1,493	6,02	1,311	2,793	5,949	1,384
3,6	1,188	1,897	3,030	1,483	6,04	1,315	2,828	6,081	1,381
3,8	1,196	1,949	3,176	1,474	6,06	1,319	2,864	6,214	1,379
4,0	1,204	2,000	3,322	1,465	6,08	1,324	2,898	6,346	1,371
4,2	1,212	2,049	3,466	1,458	6,10	1,328	2,933	6,478	1,374
4,4	1,219	2,098	3,610	1,451	6,12	1,331	2,968	6,609	1,372
4,6	1,226	2,145	3,752	1,445	6,13	1,335	3,006	6,740	1,370
4,8	1,232	2,191	3,894	1,439	6,15	1,339	3,033	6,870	1,369
5,0	1,239	2,236	4,035	1,434	6,16	1,343	3,066	7,001	1,366
5,2	1,245	2,280	4,176	1,428	6,18	1,346	3,098	7,131	1,364
5,4	1,251	2,324	4,316	1,424	6,19	1,350	3,130	7,260	1,363

$\Gamma_{\max} = 0,005, n = 4$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A-\Pi}{A_\Pi}$	$\frac{t_0}{A_\Pi}$	R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A-\Pi}{A_\Pi}$	$\frac{t_0}{A-\Pi}$
1,2	1,021	1,125	1,354	1,492	0,508	7,8	1,168	1,948	4,006	6,676	1,728	0,733	0,734
1,4	1,034	1,248	2,305	0,573	0,508	8,0	1,120	1,964	4,074	6,835	1,725	0,735	0,735
1,6	1,044	1,217	1,478	1,708	2,196	0,605	1,174	1,979	4,143	6,944	1,721	0,736	0,736
1,8	1,062	1,260	1,587	1,883	2,058	0,626	0,642	8,6	2,009	4,212	7,311	1,717	0,737
2,0	1,069	1,299	1,694	1,797	2,281	0,638	0,652	8,8	1,176	4,348	7,469	1,710	0,738
2,4	1,076	1,107	1,336	1,797	2,403	0,626	0,661	9,0	1,180	2,039	4,415	7,658	1,707
2,6	1,082	1,371	1,897	1,897	1,404	0,626	0,668	9,2	1,183	2,052	4,481	7,985	1,704
2,8	1,088	1,435	2,574	2,744	1,940	0,680	0,675	9,4	1,183	2,067	4,547	7,942	1,740
3,0	1,093	1,093	2,090	2,090	1,465	0,680	0,685	9,6	1,185	2,081	4,613	7,98	1,741
3,2	1,098	1,127	2,184	2,184	2,083	0,685	0,691	9,8	1,188	2,108	4,679	8,257	1,742
3,4	1,103	1,130	1,494	1,494	2,366	0,685	0,693	10	1,196	2,128	4,743	8,44	1,743
3,6	1,107	1,112	1,522	1,522	2,454	0,685	0,697	11	1,203	2,234	5,371	9,972	1,746
3,8	1,112	1,127	1,548	1,548	2,511	0,685	0,700	12	1,208	2,291	5,672	10,755	1,753
4,0	1,116	1,116	1,574	1,574	2,627	0,686	0,703	13	1,216	2,316	5,936	12,513	1,755
4,2	1,119	1,119	1,599	1,599	2,712	0,686	0,705	15	1,224	2,332	5,954	12,238	1,757
4,4	1,123	1,127	623	623	2,795	0,686	0,708	16	1,227	2,448	6,812	13,039	1,760
4,6	1,130	1,130	646	646	2,877	0,686	0,710	17	1,237	2,496	7,083	14,532	1,762
4,8	1,133	1,133	663	663	2,958	0,686	0,712	18	1,241	2,585	7,611	16,054	1,763
5,0	1,136	1,136	690	690	3,038	0,686	0,714	19	1,246	2,628	7,868	16,803	1,765
5,2	1,139	1,139	732	732	3,117	0,686	0,716	20	1,250	2,669	8,122	17,546	1,767
5,4	1,142	1,142	762	762	3,195	0,686	0,718	21	1,254	2,709	8,372	18,289	1,770
5,6	1,145	1,145	779	779	3,279	0,686	0,720	22	1,258	2,747	8,621	19,619	1,771
5,8	1,148	1,148	791	791	3,349	0,686	0,721	23	1,261	2,785	8,862	19,767	1,772
6,0	1,150	1,150	810	810	3,424	0,686	0,724	24	1,265	2,821	9,036	21,585	1,774
6,2	1,153	1,153	829	829	3,500	0,686	0,724	25	1,268	2,856	9,103	21,581	1,775
6,4	1,155	1,155	847	847	3,574	0,686	0,726	26	1,271	2,887	9,174	21,577	1,776
6,6	1,157	1,157	864	864	3,647	0,686	0,728	27	1,274	2,924	9,575	21,972	1,777
6,8	1,160	1,160	882	882	3,720	0,686	0,730	28	1,277	2,956	9,808	22,703	1,778
7,0	1,162	1,162	899	899	3,792	0,686	0,731	29	1,280	2,989	10,037	23,432	1,779
7,2	1,164	1,164	915	915	3,864	0,686	0,732	30	1,283	2,980	10,037	23,432	1,779
7,4	1,166	1,166	915	915	3,934	0,686	0,732						
7,6	1,166	1,166	915	915	3,934	0,686	0,732						

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 6.3

 $\Gamma_{\max} = 0,005, n = 5$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A-\Pi}{A_\Pi}$	$\frac{t_0}{A_\Pi}$	R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A-\Pi}{A_\Pi}$	$\frac{t_0}{A-\Pi}$			
1,2	1,016	1,049	1,095	1,283	1,180	0,529	7,8	1,104	1,557	2,793	5,008	7,066	2,122	0,801		
1,4	1,032	1,119	1,265	1,430	1,366	0,529	8,0	1,105	1,565	2,828	5,110	7,117	2,117	0,803		
1,6	1,037	1,148	1,342	1,744	1,735	0,599	0,641	8,4	1,106	1,573	2,863	5,212	7,144	2,112	0,805	
1,8	1,047	1,174	1,483	1,837	2,198	0,635	2,254	0,666	8,4	1,107	1,581	2,898	5,312	7,187	2,107	0,806
2,0	1,051	1,220	1,569	1,743	2,198	0,635	2,255	0,684	8,6	1,108	1,588	2,932	5,413	7,761	2,102	0,806
2,4	1,055	1,241	1,619	1,905	2,484	0,626	0,724	0,709	8,8	1,109	1,596	2,967	5,513	7,934	2,097	0,807
2,8	1,058	1,260	1,673	1,732	2,292	0,626	0,724	0,726	9,0	1,110	1,604	3,006	5,613	8,107	2,093	0,808
3,0	1,061	1,278	1,738	1,789	2,346	0,620	0,727	0,733	9,2	1,112	1,610	3,036	5,712	8,280	2,084	0,810
3,2	1,064	1,296	1,804	1,897	3,007	0,620	0,730	0,739	9,4	1,113	1,625	3,098	5,810	8,452	2,084	0,812
3,4	1,067	1,312	1,847	1,897	3,171	0,620	0,730	0,744	10	1,115	1,638	3,130	6,006	8,625	2,086	0,813
3,6	1,069	1,328	1,892	1,892	3,365	0,620	0,730	0,746	10	1,116	1,642	3,162	6,104	8,970	2,072	0,814
3,8	1,072	1,343	1,943	1,943	3,565	0,620	0,730	0,746	12	1,123	1,670	3,197	6,330	9,830	2,054	0,815
4,0	1,076	1,377	1,974	1,974	3,757	0,620	0,730	0,746	12	1,126	1,700	3,464	7,058	10,687	2,038	0,816
4,2	1,080	1,388	2,049	2,049	3,957	0,620	0,730	0,746	14	1,130	1,728	3,605	7,523	12,540	2,024	0,817
4,4	1,084	1,410	2,191	2,191	4,143	0,620	0,730	0,746	14	1,130	1,754	3,742	7,980	12,392	2,011	0,818
4,6	1,088	1,433	2,336	2,336	4,345	0,620	0,730	0,746	15	1,136	1,779	3,873	8,432	13,241	2,000	0,819
5,0	1,092	1,465	2,406	2,406	4,535	0,620	0,730	0,746	16	1,136	1,802	4,000	8,877	14,088	1,990	0,820
5,2	1,095	1,486	2,493	2,493	4,729	0,620	0,730	0,746	17	1,137	1,824	4,123	9,317	14,934	1,980	0,821
5,4	1,098	1,523	2,530	2,530	5,015	0,620	0,730	0,746	18	1,141	1,845	4,243	9,75	15,777	1,971	0,822
5,6	1,102	1,564	2,608	2,608	5,299	0,620	0,730	0,746	19	1,143	1,866	4,369	10,181	16,618	1,963	0,824
5,8	1,104	1,591	2,666	2,666	5,518	0,620	0,730	0,746	20	1,146	1,886	4,492	10,607	17,458	1,955	0,825
6,0	1,106	1,620	2,717	2,717	5,718	0,620	0,730	0,746	21	1,148	1,904	4,633	11,028	18,296	1,942	0,826
6,2	1,109	1,646	2,749	2,749	5,908	0,620	0,730	0,746	22	1,150	1,922	4,761	11,445	19,990	1,936	0,827
6,4	1,112	1,676	2,780	2,780	6,122	0,620	0,730	0,746	23	1,152	1,949	4,888	12,856	21,628	1,935	0,828
6,6	1,114	1,705	2,824	2,824	6,317	0,620	0,730	0,746	24	1,154	1,975	5,008	13,728	22,466	1,933	0,829
6,8	1,116	1,732	2,924	2,924	6,516	0,620	0,730	0,746	25	1,156	1,988	5,199	13,478	23,296	1,932	0,830
7,0	1,118	1,761	2,992	2,992	6,716	0,620	0,730	0,746	26	1,159	2,003	5,392	14,292	24,953	1,931	0,831
7,2	1,120	1,792	3,036	3,036	6,915	0,620	0,730	0,746	27	1,162	2,032	5,585	14,269	24,953	1,931	0,832
7,4	1,122	1,821	3,094	3,094	7,114	0,620	0,730	0,746	28	1,164	2,046	5,777	14,477	25,780	1,931	0,833
7,6	1,124	1,851	3,152	3,152	7,312	0,620	0,730	0,746								

Приложение табл. 6.3

$$|\Gamma|_{\text{WKC}} = 0,005, \quad n = 6$$

$$|\Gamma|_{\text{max}} = 0.005, \eta = 7$$

Гродольжеские таблицы. 63

Продолжение табл. 6.3

$|\Gamma|_{\text{M}\ddot{\text{a}}\text{KC}} = 0,005, n = 8$

Приложение табл. 6.3

$$|1|_{\text{max}} = 0.005, \ n=8$$

| $\Gamma_{\max} = 0,005$, $n = 9$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	$\frac{\rho_9}{\rho_{10}}$	$\frac{\rho_8 - \rho_9}{\rho_{10}}$
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	$\frac{\rho_9}{\rho_{10}}$	$\frac{\rho_8 - \rho_9}{\rho_{10}}$
1.2	1.010	1.023	1.043	1.067	1.095	1.124	1.151	1.173	1.188	1.207	0.558	0.547
1.4	1.013	1.036	1.072	1.097	1.123	1.147	1.168	1.190	1.195	1.209	0.695	0.727
1.6	1.015	1.053	1.119	1.139	1.216	1.264	1.342	1.414	1.450	1.530	0.576	0.747
1.8	1.017	1.018	1.060	1.077	1.119	1.206	1.268	1.296	1.343	1.463	0.586	0.751
2.0	1.020	1.021	1.067	1.072	1.119	1.216	1.268	1.313	1.365	1.483	0.570	0.770
2.2	1.022	1.022	1.077	1.087	1.120	1.216	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
2.4	1.022	1.028	1.082	1.097	1.123	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
2.6	1.022	1.023	1.086	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
2.8	1.023	1.024	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
3.0	1.023	1.024	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
3.2	1.023	1.025	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
3.4	1.023	1.025	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
3.6	1.023	1.026	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
3.8	1.023	1.026	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
4.0	1.023	1.026	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
4.2	1.023	1.027	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
4.4	1.023	1.027	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
4.6	1.023	1.028	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
4.8	1.023	1.028	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
5.0	1.023	1.029	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
5.2	1.023	1.029	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
5.4	1.023	1.030	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
5.6	1.023	1.030	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
5.8	1.023	1.030	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
6.0	1.023	1.031	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
6.2	1.023	1.031	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
6.4	1.023	1.032	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
6.6	1.023	1.032	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
6.8	1.023	1.032	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
7.0	1.023	1.032	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
7.2	1.023	1.032	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
7.4	1.023	1.033	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785
7.6	1.023	1.033	1.093	1.097	1.124	1.217	1.266	1.313	1.365	1.483	0.586	0.785

Продолжение табл. 6.3

| $\Gamma_{\max} = 0,005$, $n = 9$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	$\frac{\rho_9}{\rho_{10}}$	$\frac{\rho_8 - \rho_9}{\rho_{10}}$
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	$\frac{\rho_9}{\rho_{10}}$	$\frac{\rho_8 - \rho_9}{\rho_{10}}$
7.8	1.033	1.042	1.040	1.042	1.090	2.793	4.084	5.572	6.827	7.549	0.915	0.915
8.0	1.033	1.043	1.041	1.042	1.090	2.828	4.157	5.694	6.994	7.740	0.905	0.917
8.2	1.034	1.045	1.041	1.043	1.090	2.864	4.229	5.816	7.160	7.933	0.894	0.919
8.4	1.034	1.047	1.042	1.045	1.090	2.898	4.301	5.937	7.326	8.124	0.884	0.921
8.6	1.034	1.047	1.042	1.045	1.090	2.933	4.372	6.058	7.349	8.124	0.873	0.923
8.8	1.034	1.047	1.042	1.045	1.090	2.967	4.443	6.178	7.457	8.107	0.864	0.925
9.0	1.035	1.048	1.042	1.045	1.090	3.000	4.517	6.298	7.522	8.182	0.854	0.926
9.2	1.035	1.048	1.042	1.045	1.090	3.033	4.583	6.417	7.639	8.291	0.845	0.929
9.4	1.035	1.048	1.042	1.045	1.090	3.066	4.653	6.533	7.757	8.382	0.837	0.930
9.6	1.035	1.048	1.042	1.045	1.090	3.099	4.721	6.655	7.879	8.473	0.828	0.934
9.8	1.035	1.048	1.042	1.045	1.090	3.132	4.790	6.774	8.002	8.562	0.819	0.935
10	1.036	1.048	1.042	1.045	1.090	3.162	4.856	6.892	8.116	8.662	0.810	0.935
11	1.036	1.048	1.042	1.045	1.090	3.197	4.928	7.007	8.235	8.751	0.801	0.936
12	1.037	1.048	1.042	1.045	1.090	3.232	5.000	7.121	8.352	8.869	0.792	0.937
13	1.037	1.048	1.042	1.045	1.090	3.266	5.063	7.236	8.466	8.982	0.783	0.938
14	1.039	1.048	1.042	1.045	1.090	3.297	5.130	7.349	8.579	9.100	0.774	0.939
15	1.039	1.048	1.042	1.045	1.090	3.331	5.200	7.463	8.693	9.213	0.765	0.940
16	1.040	1.048	1.042	1.045	1.090	3.370	5.264	7.577	8.807	9.326	0.756	0.941
17	1.040	1.048	1.042	1.045	1.090	3.415	5.337	7.690	8.921	9.439	0.747	0.942
18	1.040	1.048	1.042	1.045	1.090	3.459	5.409	7.803	9.054	9.552	0.738	0.943
19	1.041	1.048	1.042	1.045	1.090	3.501	5.481	8.015	9.177	9.662	0.729	0.944
20	1.042	1.048	1.042	1.045	1.090	3.533	5.553	8.128	9.298	9.770	0.720	0.945
21	1.042	1.048	1.042	1.045	1.090	3.570	5.624	8.241	9.419	9.877	0.711	0.946
22	1.043	1.048	1.042	1.045	1.090	3.601	5.693	8.353	9.538	9.985	0.702	0.947
23	1.043	1.048	1.042	1.045	1.090	3.637	5.764	8.467	9.651	1.000	0.693	0.948
24	1.043	1.048	1.042	1.045	1.090	3.674	5.835	8.577	9.764	1.000	0.684	0.949
25	1.044	1.048	1.042	1.045	1.090	3.709	5.906	8.688	9.877	1.000	0.675	0.950
26	1.044	1.048	1.042	1.045	1.090	3.743	5.977	8.801	9.988	1.000	0.666	0.951
27	1.044	1.048	1.042	1.045	1.090	3.777	6.048	9.012	1.000	1.000	0.657	0.952
28	1.045	1.048	1.042	1.045	1.090	3.811	6.119	9.123	1.000	1.000	0.648	0.953
29	1.045	1.048	1.042	1.045	1.090	3.845	6.189	9.234	1.000	1.000	0.639	0.954
30	1.045	1.048	1.042	1.045	1.090	3.879	6.259	9.345	1.000	1.000	0.630	0.955

$|\Gamma|_{\max} = 0.005, n = 10$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	$\frac{\rho_{10}}{\rho_{11}}$
1,2	1,021	1,037	1,061	1,082	1,109	1,134	1,157	1,189	1,231	1,290	0,562	0,562
1,4	1,012	1,031	1,061	1,082	1,121	1,212	1,269	1,319	1,384	6,673	0,703	0,703
1,6	1,014	1,039	1,061	1,082	1,121	1,310	1,400	1,480	1,578	6,135	0,758	0,758
2,0	1,015	1,045	1,061	1,099	1,178	1,403	1,528	1,638	1,773	6,032	0,779	0,779
2,2	1,017	1,056	1,061	1,127	1,210	1,339	1,493	1,653	1,903	1,996	0,759	0,759
2,4	1,018	1,060	1,064	1,064	1,240	1,393	1,579	1,775	1,951	2,084	5,437	0,777
2,6	1,019	1,064	1,064	1,064	1,240	1,443	1,662	1,894	2,105	2,235	5,311	0,805
2,8	1,020	1,068	1,068	1,068	1,622	1,539	1,820	2,127	2,443	2,652	6,209	0,816
3,0	1,021	1,071	1,071	1,071	1,722	1,346	1,893	2,240	2,561	2,801	5,124	0,826
3,2	1,021	1,074	1,081	1,081	1,811	1,625	1,968	2,362	2,710	2,979	5,051	0,835
3,4	1,021	1,076	1,076	1,076	1,889	1,400	2,040	2,462	2,858	3,135	4,988	0,843
3,6	1,022	1,079	1,079	1,079	1,958	1,400	2,066	2,571	3,006	3,335	4,832	0,850
3,8	1,022	1,082	1,082	1,082	2,005	1,419	2,179	2,678	3,153	3,523	4,883	0,856
4,0	1,023	1,084	1,084	1,084	2,123	1,437	2,246	2,884	3,299	3,911	4,839	0,862
4,2	1,023	1,087	1,087	1,087	2,120	1,454	2,311	2,889	3,494	3,866	4,105	0,868
4,4	1,024	1,089	1,089	1,089	2,126	1,470	2,366	2,992	3,588	4,217	4,299	0,873
4,6	1,024	1,091	1,091	1,091	2,123	1,486	2,439	3,093	3,732	4,217	4,492	0,877
4,8	1,024	1,093	1,093	1,093	2,129	1,502	2,191	2,563	3,196	3,875	4,393	0,882
5,0	1,025	1,094	1,094	1,094	2,125	1,516	2,191	2,623	3,297	4,017	4,568	0,886
5,2	1,025	1,094	1,094	1,094	2,125	1,531	1,983	2,623	3,297	4,159	4,744	0,890
5,4	1,025	1,098	1,098	1,098	2,123	1,547	2,013	2,682	3,497	4,300	4,918	0,894
5,6	1,025	1,099	1,099	1,099	2,126	1,558	2,043	2,740	3,593	4,441	5,093	0,897
5,8	1,026	1,099	1,099	1,099	2,126	1,561	2,073	2,798	3,690	4,581	5,654	0,901
6,0	1,026	1,099	1,099	1,099	2,126	1,561	2,102	2,854	4,721	5,442	6,484	0,904
6,2	1,026	1,099	1,099	1,099	2,126	1,576	2,130	2,911	3,882	4,860	6,616	0,907
6,4	1,026	1,099	1,099	1,099	2,126	1,581	2,185	2,966	3,977	4,999	5,964	0,913
6,6	1,027	1,097	1,097	1,097	2,127	1,621	2,051	2,921	4,072	5,137	6,621	0,915
6,8	1,027	1,098	1,098	1,098	2,128	1,629	2,122	3,074	4,165	5,275	6,814	0,918
7,0	1,027	1,098	1,098	1,098	2,129	1,632	2,238	3,128	4,268	5,412	6,428	0,920
7,2	1,027	1,099	1,099	1,099	2,129	1,635	2,264	3,180	4,351	5,494	6,657	0,923
7,4	1,028	1,099	1,099	1,099	2,130	1,636	2,289	3,232	4,442	5,686	6,830	0,924
7,6	1,028	1,099	1,099	1,099	2,130	1,636	2,314	3,284	4,534	6,822	7,394	0,925

Продолжение табл. 6.3
 $|\Gamma|_{\max} = 0.005, n = 10$
 $|\Gamma|_{\max} = 0.005, n = 10$
 $|\Gamma|_{\max} = 0.005, n = 30$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	$\frac{\rho_{10}}{\rho_{11}}$
7,8	1,028	1,114	1,114	1,114	1,309	1,687	2,339	3,385	4,624	5,958	7,002	7,587
8,0	1,028	1,116	1,116	1,116	1,313	1,697	2,363	3,436	4,714	6,093	7,174	7,780
8,2	1,028	1,117	1,117	1,117	1,317	1,707	2,387	3,456	4,804	6,228	7,347	7,973
8,4	1,029	1,117	1,117	1,117	1,324	1,717	2,433	3,516	4,893	6,363	7,519	8,166
8,6	1,029	1,118	1,118	1,118	1,327	1,726	2,456	3,582	4,982	6,497	7,692	8,359
8,8	1,029	1,119	1,119	1,119	1,330	1,736	2,479	3,630	5,158	7,864	8,552	9,322
9,0	1,029	1,120	1,120	1,120	1,333	1,745	2,513	3,678	5,245	8,035	8,745	9,338
9,2	1,029	1,121	1,121	1,121	1,333	1,754	2,544	3,726	5,332	8,207	8,938	9,312
9,4	1,029	1,122	1,122	1,122	1,337	1,763	2,572	3,773	5,418	8,379	9,131	9,302
9,6	1,029	1,123	1,123	1,123	1,340	1,772	2,595	3,826	5,504	8,550	9,324	9,343
9,8	1,030	1,124	1,124	1,124	1,343	1,780	2,620	3,866	5,690	7,430	8,721	9,292
10	1,030	1,124	1,124	1,124	1,346	1,789	2,649	4,090	6,012	8,087	9,710	9,946
11	1,030	1,124	1,124	1,124	1,360	1,790	2,689	4,301	6,125	8,174	9,747	9,955
12	1,031	1,125	1,125	1,125	1,373	1,801	2,707	2,876	4,517	6,831	9,384	10,564
13	1,032	1,125	1,125	1,125	1,385	1,805	2,727	2,976	4,736	7,025	10,448	11,937
14	1,032	1,125	1,125	1,125	1,385	1,805	2,747	3,076	4,918	7,230	10,620	11,939
15	1,033	1,125	1,125	1,125	1,396	1,806	2,767	3,176	5,110	7,622	10,660	11,945
16	1,033	1,125	1,125	1,125	1,407	1,806	2,786	3,276	5,305	7,929	11,340	12,924
17	1,033	1,125	1,125	1,125	1,417	1,806	2,806	3,376	5,500	8,009	11,710	13,250
18	1,034	1,125	1,125	1,125	1,435	1,806	2,826	3,476	5,690	8,199	11,919	14,284
19	1,034	1,125	1,125	1,125	1,443	1,806	2,860	3,576	5,880	8,389	12,543	15,664
20	1,035	1,125	1,125	1,125	1,453	1,806	2,896	3,676	6,080	8,571	13,163	16,644
21	1,035	1,125	1,125	1,125	1,459	1,806	2,916	3,776	6,276	8,780	13,503	17,603
22	1,035	1,125	1,125	1,125	1,466	1,806	2,956	3,876	6,476	8,984	13,919	18,370
23	1,035	1,125	1,125	1,125	1,476	1,806	2,996	3,976	6,676	9,196	14,304	19,304
24	1,036	1,125	1,125	1,125	1,486	1,806	3,036	4,076	6,876	9,408	14,648	20,674
25	1,036	1,125	1,125	1,125	1,496	1,806	3,086	4,176	7,076	9,648	15,041	21,287
26	1,036	1,125	1,125	1,125	1,499	1,806	3,136	4,276	7,276	9,848	15,437	21,908
27	1,037	1,125	1,125	1,125	1,504	1,806	3,186	4,376	7,476	9,984	15,837	22,394
28	1,037	1,125	1,125	1,125	1,510	1,806	3,236	4,476	7,676	10,166	16,208	22,908
29	1,037	1,125	1,125	1,125	1,516	1,806	3,286	4,576	7,876	10,341	16,642	23,890
30	1,037	1,125	1,125	1,125	1,517	1,806	3,336	4,676	8,076	10,535	17,216	24,873

$|\Gamma|_{\max} = 0,005, n = 11$

Продолжение табл. 6.3

R	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	$\frac{t_0}{\Delta \Pi}$
1.2	1.009	1.019	1.033	1.051	1.072	1.095	1.119	1.142	1.162	1.178	1.189	0.563
1.4	1.011	1.027	1.053	1.088	1.133	1.183	1.236	1.286	1.329	1.363	1.385	0.605
1.6	1.013	1.034	1.059	1.093	1.149	1.187	1.246	1.286	1.347	1.372	1.397	0.738
1.8	1.014	1.044	1.064	1.096	1.149	1.236	1.341	1.414	1.566	1.661	1.776	0.763
2.0	1.016	1.048	1.076	1.107	1.198	1.284	1.414	1.560	1.702	1.876	1.971	0.782
2.2	1.016	1.051	1.067	1.096	1.166	1.220	1.364	1.549	1.758	1.968	2.099	0.798
2.4	1.016	1.056	1.077	1.107	1.166	1.240	1.403	1.673	1.947	2.025	2.150	0.811
2.6	1.017	1.067	1.087	1.117	1.174	1.268	1.438	1.734	1.947	2.025	2.170	0.823
2.8	1.018	1.060	1.080	1.118	1.176	1.276	1.441	1.729	1.937	2.032	2.176	0.833
3.0	1.018	1.063	1.084	1.119	1.179	1.292	1.449	1.741	1.945	2.032	2.180	0.842
3.2	1.019	1.064	1.085	1.121	1.175	1.308	1.536	1.844	1.939	2.029	2.180	0.850
3.4	1.019	1.067	1.089	1.120	1.176	1.323	1.556	1.897	1.949	2.038	2.183	0.857
3.6	1.019	1.070	1.090	1.120	1.176	1.337	1.595	1.949	2.038	2.183	2.234	0.864
3.8	1.020	1.071	1.091	1.121	1.176	1.338	1.600	1.950	2.040	2.183	2.234	0.870
4.0	1.020	1.072	1.092	1.121	1.177	1.343	1.600	1.949	2.040	2.183	2.234	0.875
4.2	1.020	1.074	1.094	1.122	1.178	1.353	1.600	1.949	2.040	2.183	2.234	0.875
4.4	1.021	1.074	1.094	1.122	1.178	1.376	1.649	1.949	2.040	2.183	2.234	0.880
4.6	1.021	1.076	1.096	1.124	1.180	1.388	1.700	2.056	2.145	2.186	2.234	0.885
4.8	1.021	1.077	1.097	1.124	1.183	1.399	1.725	2.056	2.145	2.186	2.234	0.890
5.0	1.022	1.079	1.098	1.125	1.185	1.410	1.749	2.056	2.145	2.186	2.234	0.894
5.2	1.022	1.080	1.102	1.126	1.186	1.421	1.772	2.056	2.145	2.186	2.234	0.916
5.4	1.022	1.081	1.103	1.126	1.187	1.431	1.794	2.056	2.145	2.186	2.234	0.919
5.6	1.022	1.081	1.103	1.126	1.187	1.441	1.794	2.056	2.145	2.186	2.234	0.922
5.8	1.023	1.083	1.104	1.128	1.188	1.451	1.816	2.056	2.145	2.186	2.234	0.924
6.0	1.023	1.085	1.106	1.128	1.188	1.461	1.838	2.056	2.145	2.186	2.234	0.925
6.2	1.023	1.086	1.106	1.128	1.188	1.471	1.858	2.056	2.145	2.186	2.234	0.926
6.4	1.023	1.087	1.107	1.128	1.188	1.479	1.879	2.056	2.145	2.186	2.234	0.927
6.6	1.023	1.088	1.108	1.128	1.188	1.488	1.898	2.056	2.145	2.186	2.234	0.928
6.8	1.023	1.089	1.109	1.128	1.188	1.496	1.918	2.056	2.145	2.186	2.234	0.929
7.0	1.024	1.090	1.110	1.129	1.189	1.504	1.938	2.056	2.145	2.186	2.234	0.930
7.2	1.024	1.092	1.111	1.129	1.189	1.512	1.956	2.056	2.145	2.186	2.234	0.930
7.4	1.024	1.092	1.111	1.129	1.189	1.520	1.973	2.056	2.145	2.186	2.234	0.930
7.6	1.024	1.093	1.112	1.129	1.189	1.528	1.984	2.056	2.145	2.186	2.234	0.930

Продолжение табл. 6.3

$|\Gamma|_{\max} = 0,005, n = 11$

R	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	$\frac{t_0}{\Delta \Pi}$
7.9	1.024	1.093	1.095	1.246	1.535	2.028	2.793	3.846	5.080	6.256	7.131	0.337
8.0	1.024	1.095	1.096	1.250	1.550	2.062	2.828	3.864	5.185	6.361	7.208	0.339
8.2	1.025	1.096	1.096	1.251	1.557	2.078	2.844	3.877	5.200	6.385	7.238	0.341
8.4	1.025	1.097	1.096	1.251	1.558	2.095	2.868	3.892	5.202	6.395	7.252	0.343
8.6	1.025	1.097	1.096	1.251	1.558	2.111	2.893	3.906	5.202	6.393	7.262	0.345
8.8	1.025	1.098	1.097	1.251	1.558	2.127	2.908	3.916	5.202	6.393	7.262	0.345
9.0	1.025	1.099	1.098	1.251	1.558	2.142	2.922	3.926	5.202	6.393	7.262	0.345
9.2	1.025	1.099	1.099	1.251	1.558	2.157	2.937	3.935	5.202	6.393	7.262	0.345
9.4	1.025	1.100	1.100	1.251	1.560	2.172	2.952	3.945	5.202	6.393	7.262	0.345
9.6	1.026	1.101	1.101	1.252	1.567	2.187	2.963	3.954	5.202	6.393	7.262	0.345
9.8	1.026	1.102	1.102	1.254	1.571	2.197	2.974	3.964	5.202	6.393	7.262	0.345
10.	1.026	1.102	1.102	1.254	1.571	2.207	3.162	4.840	6.214	7.704	9.555	0.351
11.	1.026	1.102	1.105	1.254	1.571	2.217	3.172	4.850	6.214	7.847	9.793	0.351
12.	1.027	1.108	1.120	1.255	1.571	2.227	3.182	4.861	6.214	7.920	9.830	0.352
13.	1.027	1.111	1.121	1.256	1.571	2.237	3.192	4.871	6.214	7.920	9.830	0.352
14.	1.028	1.113	1.121	1.256	1.571	2.246	3.201	4.881	6.214	7.920	9.830	0.352
15.	1.028	1.115	1.121	1.256	1.571	2.256	3.210	4.891	6.214	7.920	9.830	0.352
16.	1.028	1.117	1.121	1.256	1.571	2.266	3.219	4.899	6.222	7.920	9.830	0.352
17.	1.029	1.119	1.121	1.256	1.571	2.276	3.228	4.909	6.222	7.920	9.830	0.352
18.	1.029	1.120	1.123	1.256	1.571	2.286	3.238	4.919	6.222	7.920	9.830	0.352
19.	1.029	1.123	1.124	1.256	1.571	2.296	3.248	4.929	6.222	7.920	9.830	0.352
20.	1.030	1.124	1.124	1.256	1.571	3.032	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
21.	1.030	1.124	1.126	1.256	1.571	3.037	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
22.	1.030	1.126	1.127	1.256	1.571	3.043	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
23.	1.031	1.130	1.130	1.256	1.571	3.049	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
24.	1.031	1.132	1.132	1.256	1.571	3.055	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
25.	1.031	1.132	1.132	1.256	1.571	3.061	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
26.	1.031	1.134	1.134	1.256	1.571	3.067	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
27.	1.031	1.134	1.134	1.256	1.571	3.073	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
28.	1.031	1.136	1.136	1.256	1.571	3.079	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
29.	1.031	1.136	1.136	1.256	1.571	3.085	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352
30.	1.032	1.137	1.137	1.256	1.571	3.091	3.52	8.30	7.472	8.227	10.926	0.352

11*

307

308

$$|T|_{\max} = 0.005 \quad n = 18$$

ПРАВОЛЖЕНІЕ ТАБЛ. 6-3

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	$\frac{\rho_6}{\Delta \Pi}$	$\frac{\Delta - \Pi}{\Delta \Pi}$
1, 2, 1, 4	0.008	0.016	0.022	0.027	0.041	0.057	0.076	0.095	0.115	0.135	0.153	0.168	0.181	0.190	0.565	0.565
1, 1, 2, 1, 4	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.659	0.659
1, 1, 2, 1, 4	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.710	0.710
1, 1, 2, 1, 4	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.744	0.744
1, 1, 2, 1, 4	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.770	0.770
1, 2, 2, 0, 2	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.832	0.832
1, 2, 2, 0, 2	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.842	0.842
1, 2, 2, 0, 2	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.851	0.851
1, 2, 2, 0, 2	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.859	0.859
1, 2, 2, 0, 2	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.874	0.874
1, 2, 2, 0, 2	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.886	0.886
1, 2, 2, 0, 2	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.891	0.891
1, 2, 2, 0, 2	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.896	0.896
1, 2, 2, 0, 2	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.905	0.905
1, 2, 2, 0, 2	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.917	0.917
1, 2, 2, 0, 2	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.927	0.927
1, 2, 2, 0, 2	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.937	0.937
1, 2, 2, 0, 2	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.945	0.945
1, 2, 2, 0, 2	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.952	0.952
1, 2, 2, 0, 2	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.959	0.959
1, 2, 2, 0, 2	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.962	0.962
1, 2, 2, 0, 2	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.966	0.966
1, 2, 2, 0, 2	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.971	0.971
1, 2, 2, 0, 2	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.975	0.975
1, 2, 2, 0, 2	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.979	0.979
1, 2, 2, 0, 2	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.982	0.982
1, 2, 2, 0, 2	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.985	0.985
1, 2, 2, 0, 2	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.988	0.988
1, 2, 2, 0, 2	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.990	0.990
1, 2, 2, 0, 2	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.992	0.992
1, 2, 2, 0, 2	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.994	0.994
1, 2, 2, 0, 2	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.995	0.995
1, 2, 2, 0, 2	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.996	0.996
1, 2, 2, 0, 2	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.997	0.997
1, 2, 2, 0, 2	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.998	0.998
1, 2, 2, 0, 2	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.056	0.999	0.999
1, 2, 2, 0, 2	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.056	0.057	1.000	1.000

Продолжение табл. 6.3

MAX 13

R	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	$\frac{P_{14}-P_{11}}{P_{14}}$	$\frac{P_{15}-P_{11}}{P_{15}}$	$\frac{P_{16}-P_{11}}{P_{16}}$
7.8	1.019	1.068	1.117	1.169	1.220	1.272	1.323	1.375	1.426	1.478	1.529	1.579	1.628	1.678	1.727	1.777
8.0	1.020	1.069	1.120	1.172	1.222	1.274	1.325	1.377	1.428	1.480	1.531	1.582	1.633	1.683	1.733	1.783
8.2	1.020	1.070	1.121	1.174	1.223	1.275	1.326	1.378	1.429	1.481	1.532	1.583	1.634	1.684	1.734	1.784
8.4	1.020	1.070	1.121	1.174	1.223	1.275	1.326	1.378	1.429	1.481	1.532	1.583	1.634	1.684	1.734	1.784
8.6	1.020	1.071	1.121	1.175	1.224	1.276	1.327	1.379	1.430	1.482	1.533	1.584	1.635	1.685	1.735	1.785
8.8	1.020	1.071	1.121	1.175	1.224	1.276	1.327	1.380	1.431	1.483	1.534	1.585	1.636	1.686	1.736	1.786
9.0	1.020	1.072	1.122	1.176	1.225	1.277	1.328	1.381	1.432	1.484	1.535	1.586	1.637	1.687	1.737	1.787
9.2	1.020	1.072	1.122	1.176	1.225	1.277	1.328	1.382	1.433	1.485	1.536	1.587	1.638	1.688	1.738	1.788
9.4	1.020	1.072	1.122	1.176	1.225	1.277	1.328	1.383	1.434	1.486	1.537	1.588	1.639	1.689	1.739	1.789
9.6	1.020	1.073	1.123	1.177	1.226	1.278	1.329	1.384	1.435	1.487	1.538	1.589	1.640	1.690	1.740	1.790
9.8	1.020	1.073	1.123	1.177	1.226	1.278	1.329	1.385	1.436	1.488	1.539	1.590	1.641	1.691	1.741	1.791
1.0	1.020	1.073	1.123	1.177	1.226	1.278	1.329	1.386	1.437	1.489	1.540	1.591	1.642	1.692	1.742	1.792
1.1	1.021	1.075	1.124	1.179	1.227	1.280	1.331	1.387	1.438	1.490	1.541	1.592	1.643	1.693	1.743	1.793
1.2	1.021	1.075	1.124	1.179	1.227	1.280	1.331	1.388	1.439	1.491	1.542	1.593	1.644	1.694	1.744	1.794
1.3	1.021	1.075	1.124	1.179	1.227	1.280	1.331	1.389	1.440	1.492	1.543	1.594	1.645	1.695	1.745	1.795
1.4	1.021	1.075	1.124	1.179	1.227	1.280	1.331	1.390	1.441	1.493	1.544	1.595	1.646	1.696	1.746	1.796
1.5	1.022	1.076	1.125	1.180	1.228	1.281	1.332	1.391	1.442	1.494	1.545	1.596	1.647	1.697	1.747	1.797
1.6	1.022	1.076	1.125	1.180	1.228	1.281	1.332	1.392	1.443	1.495	1.546	1.597	1.648	1.698	1.748	1.798
1.7	1.022	1.076	1.125	1.180	1.228	1.281	1.332	1.393	1.444	1.496	1.547	1.598	1.649	1.699	1.749	1.799
1.8	1.022	1.076	1.125	1.180	1.228	1.281	1.332	1.394	1.445	1.497	1.548	1.599	1.650	1.700	1.750	1.800
1.9	1.023	1.077	1.126	1.181	1.229	1.282	1.333	1.395	1.446	1.498	1.549	1.600	1.651	1.701	1.751	1.801
2.0	1.023	1.077	1.126	1.181	1.229	1.282	1.333	1.396	1.447	1.499	1.550	1.601	1.652	1.702	1.752	1.802
2.1	1.023	1.077	1.126	1.181	1.229	1.282	1.333	1.397	1.448	1.500	1.551	1.602	1.653	1.703	1.753	1.803
2.2	1.023	1.077	1.126	1.181	1.229	1.282	1.333	1.398	1.449	1.501	1.552	1.603	1.654	1.704	1.754	1.804
2.3	1.023	1.077	1.126	1.181	1.229	1.282	1.333	1.399	1.450	1.502	1.553	1.604	1.655	1.705	1.755	1.805
2.4	1.024	1.078	1.127	1.182	1.230	1.283	1.334	1.400	1.451	1.503	1.554	1.605	1.656	1.706	1.756	1.806
2.5	1.024	1.078	1.127	1.182	1.230	1.283	1.334	1.401	1.452	1.504	1.555	1.606	1.657	1.707	1.757	1.807
2.6	1.024	1.078	1.127	1.182	1.230	1.283	1.334	1.402	1.453	1.505	1.556	1.607	1.658	1.708	1.758	1.808
2.7	1.024	1.078	1.127	1.182	1.230	1.283	1.334	1.403	1.454	1.506	1.557	1.608	1.659	1.709	1.759	1.809
2.8	1.024	1.078	1.127	1.182	1.230	1.283	1.334	1.404	1.455	1.507	1.558	1.609	1.660	1.710	1.760	1.810
2.9	1.024	1.078	1.127	1.182	1.230	1.283	1.334	1.405	1.456	1.508	1.559	1.610	1.661	1.711	1.761	1.811

Продолжение табл. 6.3

$$|\Gamma|_{\text{Nak}} = 0,005, n = 15$$

П р о д о л ж е н и е т а б л . 6.3

1 | Make 1,003, 13

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
1,2	1,007	1,011	1,017	1,023	1,032	1,041	1,052	1,063	1,076	1,089	1,102
1,4	1,008	1,014	1,024	1,036	1,051	1,069	1,090	1,114	1,141	1,169	1,198
1,6	1,008	1,017	1,029	1,045	1,066	1,092	1,123	1,159	1,199	1,242	1,288
1,8	1,009	1,018	1,033	1,053	1,079	1,112	1,152	1,199	1,252	1,311	1,373
2,0	1,009	1,020	1,036	1,059	1,090	1,130	1,178	1,236	1,302	1,375	1,454
2,2	1,009	1,021	1,039	1,065	1,100	1,146	1,202	1,270	1,348	1,436	1,532
2,4	1,010	1,022	1,042	1,070	1,109	1,160	1,224	1,301	1,392	1,494	1,606
2,6	1,010	1,023	1,044	1,075	1,117	1,173	1,244	1,331	1,433	1,549	1,678
2,8	1,010	1,024	1,046	1,079	1,125	1,186	1,263	1,358	1,472	1,602	1,747
3,0	1,010	1,025	1,048	1,083	1,132	1,197	1,281	1,385	1,509	1,653	1,814
3,2	1,010	1,025	1,050	1,086	1,138	1,208	1,297	1,409	1,545	1,702	1,880
3,4	1,011	1,026	1,051	1,090	1,144	1,218	1,313	1,433	1,579	1,750	1,943
3,6	1,011	1,027	1,053	1,093	1,150	1,227	1,328	1,456	1,612	1,796	2,005
3,8	1,011	1,027	1,054	1,096	1,155	1,236	1,343	1,478	1,643	1,840	2,065
4,0	1,011	1,028	1,056	1,098	1,160	1,245	1,356	1,498	1,674	1,883	2,124
4,2	1,011	1,028	1,057	1,101	1,165	1,253	1,369	1,519	1,703	1,925	2,181
4,4	1,011	1,028	1,058	1,103	1,169	1,261	1,382	1,538	1,732	1,966	2,238

Продолжение табл. 6.3

| Г |_{макс} = 0,005, n = 20

R	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	$\frac{\rho_{11}-\rho}{\Delta \rho}$	$\frac{f_0}{\Delta \rho - \pi}$
1,2	1,115	1,128	1,141	1,152	1,163	1,172	1,180	1,186	1,192	1,192	15,562	0,569
1,4	1,227	1,256	1,284	1,309	1,332	1,351	1,367	1,380	1,389	14,022	0,666	
1,6	1,334	1,380	1,424	1,465	1,500	1,531	1,555	1,573	1,587	12,921	0,718	
1,8	1,437	1,501	1,562	1,618	1,668	1,709	1,742	1,767	1,785	12,266	0,754	
2,0	1,536	1,618	1,697	1,770	1,834	1,887	1,930	1,961	1,982	11,818	0,780	
2,2	1,632	1,733	1,830	1,920	1,999	2,065	2,117	2,154	2,179	11,485	0,800	
2,4	1,724	1,844	1,961	2,069	2,163	2,242	2,303	2,348	2,377	11,225	0,818	
2,6	1,809	1,954	2,089	2,216	2,327	2,417	2,490	2,541	2,574	11,014	0,832	
2,8	1,902	2,061	2,217	2,361	2,489	2,594	2,676	2,734	2,772	10,837	0,845	
3,0	1,988	2,166	2,342	2,506	2,650	2,770	2,862	2,927	2,969	10,687	0,856	
3,2	2,071	2,270	2,466	2,649	2,811	2,945	3,048	3,120	3,167	10,556	0,865	
3,4	2,153	2,382	2,589	2,792	2,971	3,120	3,233	3,314	3,364	10,441	0,874	
3,6	2,234	2,473	2,710	2,933	3,131	3,294	3,419	3,510	3,562	10,339	0,882	
3,8	2,312	2,572	2,830	3,074	3,289	3,468	3,604	3,699	3,759	10,247	0,889	
4,0	2,382	2,669	2,949	3,213	3,448	3,641	3,789	3,892	3,956	10,164	0,896	
4,2	2,465	2,766	3,067	3,352	3,591	3,814	3,974	4,085	4,154	10,088	0,902	
4,4	2,540	2,861	3,184	3,490	3,762	3,987	4,159	4,278	4,351	10,018	0,908	

| Г |_{макс} = 0,005, n = 20

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
4,6	1,011	1,029	1,059	1,106	1,174	1,268	1,394	1,557	1,760	2,006	2,293
4,8	1,011	1,029	1,060	1,108	1,178	1,275	1,406	1,575	1,787	2,045	2,347
5,0	1,011	1,030	1,061	1,110	1,182	1,282	1,417	1,592	1,813	2,083	2,400
5,2	1,011	1,030	1,062	1,112	1,186	1,289	1,428	1,609	1,839	2,120	2,452
5,4	1,012	1,030	1,063	1,114	1,189	1,295	1,438	1,626	1,864	2,157	2,504
5,6	1,012	1,031	1,064	1,116	1,193	1,301	1,448	1,642	1,888	2,192	2,554
5,8	1,012	1,031	1,065	1,118	1,196	1,307	1,458	1,657	1,912	2,228	2,604
6,0	1,012	1,031	1,065	1,119	1,199	1,313	1,468	1,672	1,935	2,262	2,653
6,2	1,012	1,032	1,066	1,121	1,202	1,318	1,477	1,687	1,958	2,296	2,701
6,4	1,012	1,032	1,067	1,122	1,205	1,324	1,486	1,702	1,980	2,329	2,748
6,6	1,012	1,032	1,068	1,124	1,208	1,329	1,495	1,716	2,002	2,361	2,795
6,8	1,012	1,032	1,068	1,125	1,211	1,334	1,503	1,730	2,024	2,393	2,841
7,0	1,012	1,033	1,069	1,127	1,214	1,339	1,512	1,743	2,045	2,425	2,887
7,2	1,012	1,033	1,070	1,128	1,217	1,344	1,520	1,756	2,065	2,456	2,932
7,4	1,012	1,033	1,070	1,130	1,219	1,348	1,528	1,769	2,085	2,486	2,976
7,6	1,012	1,033	1,071	1,131	1,222	1,353	1,535	1,782	2,105	2,516	3,020

11B

| Г |_{макс} = 0,005, n = 20

R	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	ρ_{21}	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{t_{\sigma}}{\Delta_{-\Pi}}$
4,6	2,613	2,955	3,300	3,627	3,919	4,160	4,343	4,470	4,549	9,954	0,913
4,8	2,686	3,048	3,415	3,764	4,075	4,332	4,528	4,663	4,746	9,894	0,918
5,0	2,758	3,140	3,529	3,900	4,231	4,504	4,712	4,855	4,943	9,839	0,923
5,2	2,827	3,231	3,642	4,035	4,386	4,676	4,896	5,048	5,141	9,787	0,927
5,4	2,897	3,322	3,755	4,170	4,541	4,847	5,080	5,240	5,338	9,738	0,931
5,6	2,965	3,411	3,867	4,304	4,695	5,018	5,264	5,433	5,535	9,692	0,935
5,8	3,033	3,500	3,978	4,437	4,848	5,189	5,448	5,625	5,733	9,648	0,939
6,0	3,100	3,587	4,088	4,570	5,002	5,360	5,631	5,817	5,930	9,607	0,943
6,2	3,166	3,674	4,198	4,703	5,156	5,531	5,815	6,010	6,127	9,568	0,946
6,4	3,231	3,761	4,307	4,835	5,309	5,701	5,998	6,202	6,325	9,531	0,949
6,6	3,296	3,846	4,415	4,966	5,461	5,871	6,182	6,394	6,522	9,496	0,953
6,8	3,360	3,931	4,523	5,097	5,613	6,041	6,365	6,651	6,726	9,463	0,956
7,0	3,423	4,016	4,631	5,228	5,765	6,211	6,548	6,778	6,916	9,430	0,958
7,2	3,486	4,099	4,737	5,358	5,917	6,380	6,731	6,970	7,114	9,399	0,961
7,4	3,548	4,182	4,844	5,487	6,068	6,550	6,914	7,162	7,311	9,370	0,964
7,6	3,610	4,265	4,949	5,617	6,219	6,719	7,097	7,354	7,508	9,342	0,967

315

$|\Gamma|_{\max} = 0,005, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
7,8	1,012	1,033	1,071	1,132	1,224	1,357	1,543	1,794	2,125	2,546	3,063
8,0	1,012	1,034	1,072	1,133	1,227	1,362	1,550	1,806	2,144	2,575	3,106
8,2	1,012	1,034	1,072	1,135	1,229	1,366	1,558	1,818	2,163	2,604	3,149
8,4	1,012	1,034	1,073	1,136	1,231	1,370	1,565	1,830	2,181	2,633	3,191
8,6	1,012	1,034	1,073	1,137	1,234	1,374	1,572	1,842	2,200	2,661	3,232
8,8	1,012	1,034	1,074	1,138	1,236	1,378	1,579	1,853	2,218	2,688	3,273
9,0	1,012	1,035	1,074	1,139	1,238	1,382	1,585	1,864	2,235	2,716	3,314
9,2	1,012	1,035	1,075	1,140	1,240	1,386	1,592	1,875	2,253	2,743	3,354
9,4	1,012	1,035	1,075	1,141	1,242	1,390	1,598	1,886	2,270	2,769	3,394
9,6	1,013	1,035	1,076	1,142	1,244	1,393	1,605	1,896	2,287	2,796	3,434
9,8	1,013	1,035	1,076	1,143	1,246	1,397	1,611	1,907	2,304	2,822	3,473
10	1,013	1,035	1,077	1,144	1,248	1,400	1,617	1,917	2,320	2,848	3,511
11	1,013	1,036	1,079	1,145	1,257	1,417	1,646	1,946	2,400	2,973	3,700
12	1,013	1,037	1,081	1,153	1,265	1,432	1,673	2,012	2,475	3,091	3,882
13	1,013	1,037	1,082	1,157	1,273	1,447	1,698	2,055	2,546	3,205	4,056
14	1,013	1,038	1,084	1,160	1,280	1,460	1,722	2,095	2,613	3,314	4,225

Продолжение табл. 6.3

 $|\Gamma|_{\max} = 0,005, n = 20$

R	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$
7,8	3,671	4,347	5,055	5,746	6,370	6,888	7,280	7,546	7,705	9,314	0,969	0,969
8,0	3,731	4,428	5,159	5,874	6,520	7,057	7,463	7,738	7,902	9,288	0,972	0,972
8,2	3,791	4,509	5,264	6,002	6,671	7,226	7,645	7,930	8,100	9,263	0,974	0,974
8,4	3,850	4,590	5,368	6,130	6,821	7,393	7,828	8,122	8,297	9,238	0,977	0,977
8,6	3,909	4,670	5,471	6,257	6,970	7,563	8,011	8,314	8,494	9,214	0,979	0,979
8,8	3,968	4,749	5,574	6,384	7,120	7,731	8,193	8,506	8,691	9,192	0,981	0,981
9,0	4,026	4,828	5,676	6,511	7,269	7,899	8,376	8,698	8,889	9,169	0,983	0,983
9,2	4,083	4,907	5,779	6,637	7,418	8,057	8,558	8,890	9,086	9,148	0,985	0,985
9,4	4,140	4,985	5,880	6,764	7,567	8,235	8,740	9,081	9,283	9,127	0,987	0,987
9,6	4,197	5,062	5,982	6,889	7,715	8,403	8,922	9,273	9,480	9,107	0,989	0,989
9,8	4,253	5,140	6,083	7,015	7,863	8,571	9,104	9,465	9,677	9,087	0,991	0,991
10	4,309	5,216	6,183	7,140	8,012	8,738	9,286	9,657	9,875	9,068	0,993	0,993
11	4,363	5,595	6,681	7,761	8,749	9,574	10,196	10,615	10,860	9,981	1,002	1,002
12	4,428	5,965	7,171	8,376	9,482	10,406	11,104	11,572	11,846	8,903	1,009	1,009
13	5,106	6,327	7,653	8,985	10,211	11,237	12,010	12,530	12,832	8,834	1,016	1,016
14	5,357	6,682	8,129	9,589	10,936	12,065	12,916	13,486	13,817	8,772	1,023	1,023

$\Gamma_{\max} = 0,005, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
15	1,013	1,039	1,085	1,164	1,287	1,472	1,744	2,133	2,677	3,418	4,388
16	1,013	1,039	1,087	1,167	1,293	1,484	1,765	2,170	2,739	3,519	4,547
17	1,013	1,040	1,088	1,169	1,299	1,495	1,785	2,205	2,799	3,616	4,701
18	1,014	1,040	1,089	1,172	1,304	1,505	1,804	2,238	2,855	3,710	4,851
19	1,014	1,040	1,090	1,175	1,309	1,515	1,822	2,270	2,910	3,802	4,998
20	1,014	1,041	1,091	1,177	1,314	1,524	1,839	2,301	2,963	3,890	5,141
21	1,014	1,041	1,092	1,180	1,319	1,533	1,856	2,330	3,014	3,976	5,281
22	1,014	1,041	1,093	1,181	1,323	1,542	1,872	2,359	3,064	4,060	5,418
23	1,014	1,041	1,094	1,183	1,327	1,550	1,887	2,386	3,112	4,142	5,552
24	1,014	1,042	1,095	1,185	1,331	1,558	1,902	2,413	3,159	4,222	5,684
25	1,014	1,042	1,095	1,187	1,335	1,566	1,916	2,439	3,205	4,301	5,813
26	1,014	1,042	1,096	1,189	1,339	1,573	1,930	2,464	3,249	4,377	5,940
27	1,014	1,043	1,097	1,191	1,343	1,580	1,943	2,488	3,292	4,451	6,064
28	1,014	1,043	1,098	1,192	1,346	1,587	1,956	2,511	3,335	4,525	6,188
29	1,014	1,043	1,098	1,194	1,350	1,594	1,968	2,534	3,376	4,597	6,308
30	1,014	1,043	1,099	1,196	1,353	1,600	1,980	2,557	3,416	4,668	6,427

Продолжение табл. 6.3

 $\Gamma_{\max} = 0,005, n = 20$

R	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_{\Pi}}{\Lambda - \Pi}$
15	5,603	7,030	8,599	10,188	11,557	12,890	13,820	14,443	14,802	8,715	1,029
16	5,840	7,373	9,064	10,782	12,375	13,714	14,724	15,399	15,788	8,663	1,035
17	6,074	7,710	9,523	11,372	13,090	14,536	15,626	16,354	16,773	8,615	1,040
18	6,303	8,042	9,978	11,957	13,803	15,356	16,528	17,309	17,758	8,570	1,044
19	6,528	8,370	10,428	12,540	14,512	16,175	17,429	18,265	18,743	8,529	1,049
20	6,749	8,695	10,873	13,118	15,219	16,992	18,329	19,219	19,728	8,490	1,054
21	6,966	9,012	11,315	13,694	15,924	17,797	19,228	20,174	20,713	8,454	1,058
22	7,180	9,327	11,754	14,266	16,626	18,621	20,127	21,128	21,699	8,420	1,062
23	7,390	9,639	12,189	14,435	17,326	19,434	21,025	22,082	22,683	8,388	1,065
24	7,597	9,947	12,620	15,402	18,024	20,246	21,923	23,035	23,668	8,357	1,069
25	7,801	10,252	13,048	15,966	18,720	21,056	22,819	24,010	24,653	8,328	1,072
26	8,002	10,553	13,473	16,527	19,416	21,866	23,716	24,942	25,638	8,300	1,075
27	8,200	10,852	13,896	17,086	20,107	22,674	24,611	25,895	26,622	8,274	1,078
28	8,396	11,148	14,225	17,642	20,798	23,481	25,506	26,848	27,607	8,249	1,081
29	8,590	11,442	14,733	18,196	21,487	24,287	26,401	27,801	28,592	8,225	1,084
30	8,781	11,732	15,147	18,748	22,175	25,092	27,296	28,753	29,576	8,202	1,087

Расчетные параметры чебышевских переходов

Таблица 6.4

| $\Gamma_{\max} = 0,02, n = 2$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_4	ρ_5	ρ_6	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_7	ρ_8	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$
1,2	1,057	1,135	2,386	0,295	5,6	1,554	3,605	1,295	0,436	1,0	1,796	5,569	1,238	0,447		
1,4	1,099	1,274	1,876	0,348	5,8	1,568	3,701	1,291	0,436	1,1	1,840	5,982	1,231	0,448		
1,6	1,136	1,409	1,696	0,371	6,0	1,594	3,736	1,287	0,437	1,2	1,880	6,386	1,224	0,450		
1,8	1,170	1,539	1,600	0,385	6,2	1,594	3,891	1,284	0,438	1,3	1,918	6,780	1,219	0,451		
2,0	1,201	1,665	1,539	0,394	6,4	1,606	3,984	1,280	0,439	1,4	1,954	7,168	1,213	0,452		
2,2	1,230	1,789	1,496	0,401	6,6	1,619	4,078	1,277	0,439	1,5	1,988	7,549	1,209	0,453		
2,4	1,257	1,909	1,463	0,406	6,8	1,631	4,170	1,274	0,440	1,6	2,020	7,924	1,205	0,454		
2,6	1,283	2,027	1,438	0,410	7,0	1,643	4,262	1,271	0,440	1,7	2,051	8,292	1,201	0,454		
2,8	1,307	2,143	1,417	0,414	7,2	1,654	4,352	1,268	0,441	1,8	2,081	8,655	1,197	0,455		
3,0	1,329	2,257	1,400	0,417	7,4	1,666	4,443	1,265	0,441	1,9	2,109	9,014	1,194	0,456		
3,2	1,351	2,369	1,386	0,419	7,6	1,677	4,533	1,263	0,442	2,0	2,136	9,368	1,191	0,456		
3,4	1,371	2,479	1,373	0,421	7,8	1,684	4,622	1,260	0,442	2,1	2,163	9,717	1,188	0,457		
3,6	1,391	2,588	1,362	0,423	8,0	1,699	4,711	1,258	0,443	2,2	2,188	10,061	1,186	0,458		
3,8	1,410	2,695	1,352	0,425	8,2	1,709	4,798	1,255	0,443	2,3	2,212	10,403	1,183	0,458		
4,0	1,429	2,801	1,343	0,427	8,4	1,720	4,886	1,253	0,444	2,4	2,236	10,740	1,181	0,459		
4,2	1,446	2,905	1,335	0,428	8,6	1,730	4,974	1,251	0,444	2,5	2,259	11,074	1,179	0,459		
4,4	1,463	3,008	1,328	0,430	8,8	1,740	5,060	1,249	0,445	2,6	2,281	11,405	1,177	0,459		
4,6	1,479	3,110	1,321	0,431	9,0	1,750	5,146	1,247	0,445	2,7	2,303	11,733	1,175	0,460		
4,8	1,495	3,211	1,315	0,432	9,2	1,759	5,232	1,245	0,445	2,8	2,324	12,057	1,173	0,460		
5,0	1,511	3,311	1,310	0,433	9,4	1,769	5,317	1,243	0,446	2,9	2,344	12,379	1,171	0,461		
5,2	1,525	3,410	1,305	0,434	9,6	1,778	5,401	1,241	0,446	30	2,364	12,698	1,170	0,461		
5,4	1,540	3,508	1,300	0,435	9,8	1,787	5,485	1,240	0,446							

Продолжение табл. 6.4

| $\Gamma_{\max} = 0,02, n = 3$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_5	ρ_6	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_7	ρ_8	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	
1,2	1,043	1,095	1,150	3,654	0,322	5,6	1,284	2,367	4,360	1,750	0,545	10	1,385	3,163	7,219	1,635	0,569
1,4	1,066	1,183	1,313	2,799	0,395	5,8	1,290	2,410	4,495	1,742	0,547	11	1,402	3,317	7,843	1,619	0,573
1,6	1,086	1,265	1,473	2,489	0,430	6,0	1,296	2,450	4,630	1,734	0,549	12	1,418	3,465	8,559	1,606	0,575
1,8	1,104	1,342	1,630	2,319	0,452	6,2	1,301	2,501	4,783	1,726	0,550	13	1,433	3,606	9,070	1,594	0,578
2,0	1,120	1,414	1,785	2,509	0,467	6,4	1,307	2,530	4,897	1,719	0,551	14	1,447	3,743	9,674	1,583	0,581
2,2	1,135	1,483	1,939	2,130	0,479	6,6	1,312	2,569	5,030	1,713	0,553	15	1,460	3,874	10,273	1,574	0,583
2,4	1,148	1,549	2,091	2,670	0,488	6,8	1,317	2,608	5,162	1,707	0,554	16	1,472	4,001	10,866	1,565	0,585
2,6	1,160	1,613	2,241	2,023	0,496	7,0	1,322	2,646	5,293	1,701	0,555	17	1,484	4,124	11,455	1,557	0,587
2,8	1,172	1,673	2,389	1,984	0,501	7,2	1,337	2,684	5,425	1,695	0,557	18	1,495	4,244	12,490	1,549	0,588
3,0	1,183	1,732	2,536	1,924	0,508	7,4	1,352	2,721	5,555	1,690	0,558	19	1,505	4,360	12,620	1,543	0,590
3,2	1,193	1,789	2,682	0,513	7,6	1,337	2,757	5,686	1,684	0,559	20	1,515	4,473	13,196	1,536	0,591	
3,4	1,202	1,844	2,827	1,899	0,517	7,8	1,341	2,793	5,816	1,679	0,560	21	1,526	4,584	13,769	1,530	0,593
3,6	1,212	1,898	2,971	1,876	0,521	8,0	1,346	2,829	5,945	1,674	0,561	22	1,534	4,692	14,338	1,525	0,594
3,8	1,220	1,950	3,114	1,860	0,524	8,2	1,350	2,864	6,074	1,670	0,562	23	1,543	4,797	14,94	1,519	0,595
4,0	1,229	2,000	3,255	1,843	0,528	8,4	1,354	2,899	6,203	1,665	0,563	24	1,552	4,900	15,467	1,514	0,596
4,2	1,237	2,050	3,396	1,827	0,530	8,6	1,358	2,933	6,331	1,661	0,564	25	1,560	5,002	16,027	1,510	0,598
4,4	1,244	2,098	3,536	1,814	0,533	8,8	1,362	2,967	6,459	1,657	0,564	26	1,568	5,100	16,583	1,505	0,599
4,6	1,251	2,145	3,675	1,801	0,535	9,0	1,366	3,001	6,588	1,653	0,565	27	1,575	5,198	17,138	1,501	0,600
4,8	1,258	2,191	3,814	1,789	0,538	9,2	1,370	3,034	6,714	1,649	0,566	28	1,583	5,293	17,689	1,497	0,600
5,0	1,265	2,236	3,951	1,778	0,540	9,4	1,374	3,067	6,840	1,645	0,567	29	1,590	5,387	18,238	1,493	0,601
5,2	1,272	2,281	4,088	1,768	0,542	9,6	1,378	3,099	6,967	1,642	0,568	30	1,597	5,479	18,785	1,490	0,602
5,4	1,278	2,324	4,225	1,759	0,544	9,8	1,382	3,131	7,093	1,638	0,569						

| $\Gamma_{\text{макс}} = 0,02^*$, $n = 4$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\rho_4}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_3}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_2}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_1}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_4}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_3}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_2}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_1}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_4}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_3}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_2}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_1}{\Delta_{\Pi}}$
1,2	1,036	1,118	1,158	1,331	4,996	0,334	7,8	1,206	1,095	3,911	6,469	2,186	0,628	2,179	0,629	0,628
1,4	1,053	1,132	1,236	1,350	4,986	0,416	8,0	1,208	1,029	3,979	6,776	2,172	0,630	2,166	0,630	0,630
1,6	1,075	1,184	1,234	1,460	4,958	0,458	8,2	1,212	0,044	4,112	6,928	2,166	0,632	2,166	0,632	0,632
2,0	1,084	1,277	1,567	1,844	5,045	0,504	8,6	1,215	2,075	4,243	7,233	2,159	0,633	2,153	0,634	0,634
2,4	1,093	1,318	1,669	2,180	5,852	0,519	8,8	1,217	0,075	4,208	7,337	2,147	0,635	2,147	0,635	0,635
2,6	1,108	1,393	1,867	2,347	5,765	0,531	9,0	1,219	0,105	4,377	7,537	2,141	0,637	2,135	0,637	0,637
2,8	1,115	1,427	1,962	2,672	6,96	0,541	9,2	1,221	0,105	4,437	7,689	2,135	0,638	2,135	0,638	0,638
3,0	1,121	1,460	2,055	2,672	6,59	0,557	9,4	1,223	0,134	4,563	7,840	2,130	0,639	2,125	0,639	0,639
3,2	1,126	1,492	2,146	2,844	7,8	0,563	9,8	1,226	2,149	4,626	8,142	2,119	0,640	2,119	0,640	0,640
3,4	1,132	1,522	2,235	3,004	7,515	0,563	10	1,228	2,230	4,934	8,893	2,096	0,641	2,096	0,641	0,641
3,6	1,137	1,550	3,233	3,167	7,515	0,574	11	1,237	2,294	5,233	9,640	2,076	0,646	2,076	0,646	0,646
3,8	1,142	1,578	3,409	3,239	7,484	0,574	12	1,245	2,294	5,233	9,640	2,076	0,650	2,076	0,650	0,650
4,0	1,146	1,605	3,493	3,490	7,456	0,583	13	1,250	2,354	5,382	10,191	2,041	0,654	2,041	0,654	0,654
4,2	1,150	1,631	3,576	3,615	7,431	0,587	14	1,259	2,354	5,382	10,191	2,041	0,658	2,041	0,658	0,658
4,4	1,155	1,656	3,656	3,811	7,408	0,587	15	1,259	2,354	5,382	10,191	2,041	0,658	2,041	0,658	0,658
4,6	1,159	1,680	3,733	3,971	7,369	0,594	16	1,261	2,354	5,382	10,191	2,041	0,661	2,041	0,661	0,661
4,8	1,162	1,703	3,819	4,130	7,335	0,597	17	1,277	2,354	5,382	10,191	2,041	0,664	2,041	0,664	0,664
5,0	1,166	1,726	3,897	4,288	7,305	0,600	18	1,287	2,354	5,382	10,191	2,041	0,667	2,041	0,667	0,667
5,2	1,169	1,749	3,975	4,447	7,274	0,602	19	1,292	2,354	5,382	10,191	2,041	0,669	2,041	0,669	0,669
5,4	1,173	1,770	4,052	4,604	7,247	0,605	20	1,297	2,354	5,382	10,191	2,041	0,672	2,041	0,672	0,672
5,6	1,176	1,791	4,127	4,761	7,219	0,607	21	1,297	2,354	5,382	10,191	2,041	0,674	2,041	0,674	0,674
5,8	1,179	1,812	4,192	4,919	7,200	0,610	22	1,301	2,354	5,382	10,191	2,041	0,676	2,041	0,676	0,676
6,0	1,182	1,832	4,276	5,075	7,166	0,612	23	1,301	2,354	5,382	10,191	2,041	0,678	2,041	0,678	0,678
6,2	1,185	1,852	4,352	5,232	7,136	0,614	24	1,309	2,354	5,382	10,191	2,041	0,680	2,041	0,680	0,680
6,4	1,188	1,871	4,422	5,387	7,106	0,616	25	1,313	2,354	5,382	10,191	2,041	0,682	2,041	0,682	0,682
6,6	1,190	1,890	4,500	5,494	7,073	0,618	26	1,317	2,354	5,382	10,191	2,041	0,684	2,041	0,684	0,684
6,8	1,193	1,908	4,636	5,655	6,983	0,620	27	1,321	2,354	5,382	10,191	2,041	0,686	2,041	0,686	0,686
7,0	1,196	1,926	4,704	5,705	6,853	0,623	28	1,324	2,354	5,382	10,191	2,041	0,688	2,041	0,688	0,688
7,2	1,199	1,944	4,773	5,767	6,707	0,625	29	1,327	2,354	5,382	10,191	2,041	0,689	2,041	0,689	0,689
7,4	1,201	1,961	4,843	5,843	6,515	0,625	30	1,331	2,354	5,382	10,191	2,041	0,691	2,041	0,691	0,691

Продолжение табл. 6.4

| $\Gamma_{\text{макс}} = 0,02$, $n = 5$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\rho_4}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_3}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_2}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_1}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_4}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_3}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_2}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_1}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_4}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_3}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_2}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{\rho_1}{\Delta_{\Pi}}$	
1,2	1,032	1,061	1,095	1,131	6,370	0,339	7,8	1,142	1,145	1,148	1,152	1,156	1,162	1,166	1,170	1,174	1,178
1,4	1,043	1,103	1,183	1,342	6,351	0,427	8,0	1,145	1,148	1,151	1,154	1,157	1,163	1,167	1,171	1,175	1,179
1,6	1,052	1,100	1,265	1,404	6,320	0,427	8,2	1,145	1,148	1,151	1,154	1,157	1,163	1,167	1,171	1,175	1,179
1,8	1,060	1,172	1,342	1,636	6,972	0,503	8,4	1,146	1,148	1,151	1,154	1,157	1,163	1,167	1,171	1,175	1,179
2,0	1,066	1,201	1,414	1,767	7,676	0,525	8,6	1,147	1,148	1,151	1,154	1,157	1,163	1,167	1,171	1,175	1,179
2,2	1,072	1,226	1,483	1,792	7,053	0,541	8,8	1,148	1,149	1,152	1,155	1,158	1,164	1,168	1,172	1,176	1,180
2,4	1,077	1,253	1,549	1,916	7,229	0,554	8,8	1,149	1,150	1,153	1,156	1,159	1,165	1,169	1,173	1,177	1,181
2,6	1,082	1,276	1,613	2,038	3,414	0,566	9,0	1,150	1,152	1,155	1,158	1,161	1,167	1,171	1,175	1,179	1,183
2,8	1,086	1,297	1,673	2,159	2,579	0,576	9,2	1,151	1,153	1,156	1,159	1,162	1,168	1,172	1,176	1,180	1,184
3,0	1,090	1,303	1,732	2,277	2,753	0,584	9,4	1,152	1,154	1,157	1,160	1,163	1,169	1,173	1,177	1,181	1,185
3,2	1,093	1,337	1,789	2,394	2,927	0,592	9,6	1,153	1,155	1,158	1,161	1,164	1,170	1,174	1,178	1,182	1,186
3,4	1,097	1,355	1,844	2,623	3,100	1,008	9,7	1,154	1,156	1,159	1,162	1,165	1,171	1,175	1,179	1,183	1,187
3,6	1,100	1,372	1,898	2,638	3,173	1,008	9,8	1,155	1,157	1,160	1,163	1,166	1,172	1,176	1,180	1,184	1,188
3,8	1,103	1,389	1,950	2,736	3,445	1,008	9,9	1,156	1,158	1,161	1,164	1,167	1,173	1,177	1,181	1,185	1,189
4,0	1,106	1,405	2,000	2,847	3,789	1,008	9,9	1,157	1,159	1,162	1,165	1,168	1,174	1,178	1,182	1,186	1,190
4,2	1,109	1,420	2,050	2,957	3,789	1,008	9,9	1,158	1,160	1,163	1,166	1,169	1,175	1,179	1,183	1,187	1,191
4,4	1,114	1,435	2,145	3,176	4,149	1,008	9,9	1,159	1,161	1,164	1,167	1,170	1,176	1,180	1,184	1,188	1,192
4,6	1,116	1,463	2,191	3,282	4,302	1,008	9,9	1,160	1,162	1,165	1,168	1,171	1,177	1,181	1,185	1,189	1,193
4,8	1,118	1,476	2,236	3,388	4,472	1,008	9,9	1,161	1,163	1,166	1,169	1,172	1,178	1,182	1,186	1,190	1,194
5,0	1,120	1,489	2,281	3,493	4,642	1,008	9,9	1,162	1,164	1,167	1,170	1,173	1,179	1,183	1,187	1,191	1,195
5,2	1,122	1,501	2,324	3,598	4,811	1,008	9,9	1,163	1,165	1,168	1,171	1,174	1,180	1,184	1,188	1,192	1,196
5,4	1,124	1,513	2,367	3,701	4,981	1,008	9,9	1,164	1,166	1,169	1,172	1,175	1,181	1,185	1,189	1,193	1,197
5,6	1,126	1,525	2,409	3,804	5,150	1,008	9,9	1,165	1,167	1,170	1,173	1,176	1,182	1,186	1,190	1,194	1,198
5,8	1,128	1,536	2,450	3,906	5,319	1,008	9,9	1,166	1,168	1,171	1,174	1,177	1,183	1,187	1,191	1,195	1,199
6,0	1,130	1,547	2,490	4,008	5,488	1,008	9,9	1,167	1,169	1,172	1,175	1,178	1,184	1,188	1,192	1,196	1,200
6,2	1,132	1,558	2,530	4,108	5,656	1,008	9,9	1,168	1,170	1,173	1,176	1,179	1,185	1,189	1,193	1,197	1,201
6,4	1,134	1,568	2,570	4,208	5,824	1,008	9,9	1,169	1,171	1,174	1,177	1,180	1,186	1,190	1,194	1,198	1,202
6,6	1,136	1,579	2,610	4,308	5,982	1,008	9,9	1,170	1,172	1,175	1,178	1,181	1,187	1,191	1,195	1,199	1,203
6,8	1,138	1,598	2,646	4,407	6,160	1,008	9,9	1,171	1,173	1,176	1,179	1,182	1,188	1,192	1,196	1,200	1,204
7,0	1,140	1,608	2,674	4,507	6,407	1,008	9,9	1,172	1,174								

Продолжение табл. 6.4
 $\Gamma_{\max} = 0,02, n = 6$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	$\frac{\rho_{11}}{\rho_1}$	
1,2	1,030	1,053	1,081	1,111	1,140	1,165	1,192	0,342	7,762	7,8	1,108	1,435	
1,4	1,039	1,083	1,112	1,148	1,190	1,230	1,290	0,344	5,917	6,0	1,109	1,440	
1,6	1,051	1,122	1,156	1,264	1,424	1,439	1,531	0,344	5,917	6,0	1,111	1,445	
1,8	1,056	1,151	1,156	1,316	1,520	1,530	1,586	0,343	5,913	6,0	1,111	1,445	
2,0	1,059	1,175	1,366	1,400	1,703	1,873	1,895	0,537	4,409	4,409	1,111	1,456	
2,2	1,062	1,192	1,400	1,450	1,703	2,076	2,257	4,269	9,0	9,0	1,111	1,456	
2,4	1,066	1,208	1,531	2,013	2,153	2,153	2,153	0,569	0,569	0,569	1,113	1,466	
2,6	1,069	1,222	1,494	1,875	2,291	2,618	4,186	4,067	0,582	0,582	0,582	1,114	1,471
2,8	1,072	1,236	1,532	1,958	2,427	2,798	3,929	0,601	0,601	0,601	0,601	1,115	1,475
3,0	1,075	1,249	1,560	2,038	2,562	2,978	3,923	0,609	0,609	0,609	0,609	1,116	1,480
3,2	1,077	1,261	1,606	2,117	2,696	3,157	3,923	0,615	0,615	0,615	0,615	1,117	1,485
3,4	1,079	1,273	1,641	2,194	2,828	3,335	3,923	0,623	0,623	0,623	0,623	1,117	1,492
3,6	1,081	1,284	1,674	2,270	2,960	3,614	3,769	0,629	0,629	0,629	0,629	1,120	1,498
3,8	1,083	1,284	1,707	2,345	3,091	3,692	3,728	0,634	0,634	0,634	0,634	1,120	1,502
4,0	1,085	1,304	1,738	2,417	3,220	4,106	3,691	0,640	0,640	0,640	0,640	1,120	1,507
4,2	1,087	1,314	1,768	2,489	3,349	4,183	3,691	0,644	0,644	0,644	0,644	1,120	1,512
4,4	1,089	1,323	1,798	2,489	3,798	4,349	4,183	0,657	0,657	0,657	0,657	1,120	1,517
4,6	1,090	1,324	1,826	2,482	3,629	3,604	4,403	0,656	0,656	0,656	0,656	1,120	1,522
4,8	1,092	1,340	1,854	2,698	3,730	4,403	3,651	0,657	0,657	0,657	0,657	1,120	1,527
5,0	1,095	1,343	1,881	2,764	3,857	4,757	3,571	0,656	0,656	0,656	0,656	1,120	1,532
5,2	1,095	1,348	1,908	2,831	3,982	4,933	3,546	0,660	0,660	0,660	0,660	1,120	1,537
5,4	1,096	1,356	1,934	2,896	4,934	5,110	3,501	0,667	0,667	0,667	0,667	1,120	1,542
5,6	1,097	1,356	1,934	2,896	4,934	5,110	3,501	0,670	0,670	0,670	0,670	1,120	1,547
5,8	1,098	1,373	1,959	2,961	4,230	5,216	3,480	0,676	0,676	0,676	0,676	1,120	1,552
6,0	1,099	1,385	2,008	3,025	4,353	5,482	3,482	0,682	0,682	0,682	0,682	1,120	1,557
6,2	1,101	1,392	2,032	3,151	4,476	5,496	3,443	0,687	0,687	0,687	0,687	1,120	1,562
6,4	1,102	1,392	2,055	3,213	4,719	5,834	3,425	0,692	0,692	0,692	0,692	1,120	1,567
6,6	1,103	1,403	2,078	3,274	4,840	5,989	3,409	0,697	0,697	0,697	0,697	1,120	1,572
6,8	1,104	1,411	2,100	3,334	4,960	6,300	3,378	0,693	0,693	0,693	0,693	1,120	1,577
7,0	1,105	1,417	2,122	3,394	5,080	6,366	3,364	0,687	0,687	0,687	0,687	1,120	1,582
7,2	1,106	1,429	2,144	3,453	5,199	6,690	3,378	0,685	0,685	0,685	0,685	1,120	1,587
7,4	1,107	1,429	2,165	3,512	5,318	6,865	3,387	0,692	0,692	0,692	0,692	1,120	1,592

Продолжение табл. 6.4
 $\Gamma_{\max} = 0,02, n = 6$

$\Gamma_{\max} = 0,02, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	$\frac{\rho_{11}}{\rho_1}$
1,2	1,023	1,028	1,035	1,041	1,048	1,056	1,064	1,073	1,081	1,089	1,091	1,091
1,4	1,025	1,035	1,046	1,060	1,076	1,096	1,121	1,130	1,140	1,150	1,150	1,150
1,6	1,026	1,039	1,055	1,074	1,085	1,113	1,146	1,179	1,199	1,212	1,212	1,212
1,8	1,027	1,042	1,062	1,085	1,095	1,129	1,169	1,214	1,224	1,224	1,224	1,224
2,0	1,028	1,045	1,068	1,095	1,105	1,143	1,189	1,242	1,292	1,321	1,321	1,321
2,2	1,028	1,048	1,073	1,112	1,155	1,207	1,268	1,303	1,371	1,371	1,371	1,371
2,4	1,029	1,050	1,077	1,112	1,166	1,224	1,292	1,371	1,461	1,461	1,461	1,461
3,0	1,030	1,055	1,088	1,131	1,186	1,254	1,336	1,432	1,537	1,537	1,537	1,537
3,2	1,031	1,056	1,091	1,137	1,195	1,268	1,355	1,460	1,561	1,561	1,561	1,561
3,4	1,031	1,057	1,093	1,142	1,204	1,281	1,375	1,487	1,617	1,617	1,617	1,617
3,6	1,031	1,058	1,096	1,146	1,212	1,293	1,393	1,513	1,652	1,652	1,652	1,652
3,8	1,031	1,059	1,098	1,151	1,219	1,305	1,411	1,537	1,686	1,686	1,686	1,686
4,0	1,032	1,060	1,101	1,155	1,226	1,316	1,427	1,561	1,719	1,719	1,719	1,719
4,2	1,032	1,061	1,103	1,159	1,233	1,326	1,443	1,584	1,751	1,751	1,751	1,751
4,4	1,032	1,062	1,105	1,162	1,239	1,337	1,458	1,606	1,781	1,781	1,781	1,781

| $\Gamma_{\text{макс}} = 0,02$, $n = 20$

R	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	$\frac{\Lambda - \Pi}{\Lambda + \Pi}$	$\frac{f_0}{\Lambda - \Pi}$
1,2	1,109	1,118	1,127	1,136	1,145	1,152	1,160	1,167	1,173	27,630	0,349
1,4	1,217	1,241	1,261	1,283	1,303	1,321	1,338	1,353	1,366	21,325	0,448
1,6	1,320	1,357	1,392	1,428	1,460	1,490	1,517	1,540	1,560	28,040	0,502
1,8	1,419	1,470	1,522	1,570	1,617	1,668	1,695	1,727	1,753	17,603	0,538
2,0	1,513	1,581	1,648	1,711	1,771	1,826	1,873	1,914	1,946	16,720	0,564
2,2	1,605	1,688	1,771	1,850	1,925	1,993	2,051	2,100	2,139	16,081	0,585
2,4	1,694	1,793	1,892	1,988	2,078	2,158	2,228	2,287	2,333	15,590	0,602
2,6	1,780	1,896	2,012	2,123	2,229	2,324	2,405	2,473	2,526	15,197	0,617
2,8	1,864	1,996	2,129	2,258	2,379	2,488	2,582	2,659	2,719	14,873	0,630
3,0	1,945	2,095	2,245	2,391	2,559	2,651	2,758	2,846	2,912	14,599	0,641
3,2	2,025	2,191	2,359	2,523	2,677	2,815	2,934	3,031	3,105	14,364	0,651
3,4	2,103	2,286	2,472	2,653	2,824	2,977	3,110	3,216	3,298	14,158	0,659
3,6	2,179	2,379	2,583	2,783	2,971	3,140	3,285	3,402	3,491	13,976	0,668
3,8	2,254	2,471	2,694	2,912	3,117	3,302	3,460	3,587	3,684	13,813	0,675
4,0	2,327	2,563	2,803	3,040	3,262	3,463	3,634	3,773	3,877	13,667	0,682
4,2	2,399	2,652	2,911	3,166	3,407	3,624	3,809	3,958	4,070	13,534	0,688
4,4	2,470	2,740	3,018	3,292	3,551	3,784	3,983	4,143	4,263	13,412	0,694

Продолжение табл. 6.4

| $\Gamma_{\text{макс}} = 0,02$, $n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
4,6	1,032	1,063	1,106	1,166	1,245	1,346	1,473	1,627	1,811	2,026	2,271
4,8	1,033	1,064	1,108	1,170	1,251	1,355	1,487	1,647	1,840	2,066	2,324
5,0	1,033	1,064	1,110	1,173	1,256	1,364	1,500	1,667	1,868	2,105	2,376
5,2	1,033	1,065	1,112	1,176	1,262	1,373	1,513	1,687	1,896	2,143	2,427
5,4	1,033	1,066	1,113	1,179	1,266	1,381	1,526	1,706	1,923	2,181	2,477
5,6	1,033	1,066	1,115	1,182	1,272	1,389	1,538	1,724	1,949	2,217	2,527
5,8	1,033	1,067	1,116	1,184	1,277	1,397	1,550	1,742	1,975	2,253	2,575
6,0	1,034	1,067	1,117	1,187	1,281	1,404	1,562	1,759	2,000	2,288	2,623
6,2	1,034	1,068	1,119	1,190	1,286	1,412	1,573	1,776	2,025	2,323	2,670
6,4	1,034	1,069	1,120	1,192	1,290	1,419	1,584	1,792	2,049	2,356	2,716
6,6	1,034	1,069	1,121	1,194	1,294	1,425	1,595	1,809	2,072	2,390	2,763
6,8	1,034	1,070	1,122	1,197	1,298	1,432	1,605	1,824	2,095	2,423	2,808
7,0	1,034	1,070	1,123	1,199	1,302	1,439	1,616	1,840	2,118	2,455	2,852
7,2	1,034	1,070	1,124	1,201	1,306	1,445	1,625	1,855	2,140	2,487	2,896
7,4	1,034	1,070	1,126	1,205	1,309	1,451	1,635	1,864	2,162	2,518	2,940
7,6	1,035	1,071	1,127	1,207	1,313	1,457	1,644	1,884	2,184	2,549	2,983
7,8	1,035	1,072	1,128	1,207	1,317	1,463	1,654	1,899	2,205	2,579	3,026

| $\Gamma|_{\max} = 0,02, n = 20$

R	ρ_{12}	ρ_{14}	ρ_{16}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{10}	ρ_{11}	ρ_{13}	ρ_{15}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	$\frac{\Lambda_{\text{исп}}}{\Lambda_{\text{II}}}$	$\frac{I_{\Phi}}{\Lambda_{\text{исп}}}$
4,6	2,539	2,827	3,124	3,417	3,695	3,944	4,157	4,328	4,456	4,300	0,699				
4,8	2,608	2,913	3,229	3,541	3,837	4,104	4,331	4,513	4,649	13,197	0,704				
5,0	2,675	2,998	3,333	3,664	3,980	4,263	4,505	4,698	4,841	13,101	0,709				
5,2	2,742	3,082	3,436	3,787	4,121	4,422	4,676	4,883	5,034	13,011	0,714				
5,4	2,808	3,166	3,538	3,909	4,262	4,580	4,848	5,067	5,227	12,927	0,718				
5,6	2,873	3,249	3,639	4,031	4,403	4,738	5,018	5,252	5,420	12,849	0,722				
5,8	2,937	3,330	3,741	4,152	4,544	4,897	5,197	5,437	5,612	12,775	0,726				
6,0	3,000	3,411	3,841	4,272	4,684	5,054	5,370	5,621	5,805	12,705	0,729				
6,2	3,062	3,491	3,941	4,362	4,822	5,212	5,543	5,805	5,998	12,639	0,733				
6,4	3,124	3,570	4,040	4,511	4,962	5,369	5,715	5,990	6,191	12,578	0,736				
6,6	3,185	3,649	4,138	4,630	5,100	5,526	5,887	6,174	6,383	12,516	0,739				
6,8	3,245	3,727	4,236	4,748	5,239	5,682	6,059	6,358	6,576	12,460	0,743				
7,0	3,305	3,804	4,332	4,866	5,376	5,839	6,231	6,542	6,769	12,405	0,746				
7,2	3,364	3,881	4,430	4,983	5,514	5,995	6,403	6,726	6,961	12,354	0,749				
7,4	3,422	3,970	4,525	5,199	5,651	6,150	6,575	6,910	7,154	12,304	0,752				
7,6	3,480	4,133	4,621	5,216	5,788	6,306	6,746	7,194	7,346	12,256	0,754				
7,8	3,538	4,158	4,715	5,32	5,924	6,461	6,918	7,278	7,539	12,211	0,757				

Продолжение табл. 6.4

| $\Gamma|_{\max} = 0,02, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
8,0	1,035	1,072	1,129	1,209	1,320	1,469	1,663	1,913	2,226	2,659	3,067
8,2	1,035	1,073	1,129	1,211	1,323	1,474	1,672	1,926	2,246	2,639	3,109
8,4	1,035	1,073	1,130	1,213	1,326	1,480	1,681	1,940	2,266	2,668	3,150
8,6	1,035	1,074	1,131	1,215	1,330	1,485	1,689	1,953	2,286	2,697	3,190
8,8	1,035	1,074	1,132	1,216	1,333	1,490	1,698	1,966	2,306	2,725	3,230
9,0	1,035	1,074	1,133	1,218	1,336	1,495	1,706	1,979	2,325	2,753	3,270
9,2	1,035	1,075	1,134	1,220	1,339	1,500	1,714	1,991	2,344	2,781	3,310
9,4	1,035	1,075	1,135	1,221	1,342	1,505	1,722	2,004	2,362	2,809	3,348
9,6	1,035	1,075	1,135	1,223	1,345	1,510	1,730	2,016	2,381	2,836	3,387
9,8	1,035	1,076	1,136	1,224	1,347	1,515	1,738	2,028	2,399	2,852	3,426
10	1,036	1,077	1,137	1,226	1,350	1,520	1,745	2,040	2,417	2,889	3,463
11	1,036	1,078	1,140	1,232	1,363	1,542	1,761	2,096	2,504	3,017	3,648
12	1,036	1,079	1,144	1,239	1,375	1,562	1,814	2,149	2,585	3,139	3,825
13	1,036	1,081	1,146	1,245	1,386	1,581	1,846	2,199	2,662	3,256	3,995
14	1,037	1,082	1,149	1,251	1,396	1,598	1,875	2,246	2,736	3,367	4,160
15	1,037	1,082	1,152	1,257	1,405	1,615	1,902	2,291	2,806	3,425	4,319
16	1,037	1,083	1,154	1,260	1,414	1,630	1,928	2,333	2,874	3,579	4,474

$|\Gamma|_{\max} = 0,02, n = 20$

R	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	$\frac{\rho_{11}-\rho_{22}}{\Delta \Pi}$	$\frac{t_6}{\Delta \Pi}$
8,0	3,595	4,183	4,810	5,447	6,061	6,617	7,089	7,462	7,732	12,167	0,759					
8,2	3,651	4,257	4,904	5,562	6,196	6,772	7,260	7,645	7,924	12,124	0,762					
8,4	3,706	4,330	4,998	5,677	6,332	6,926	7,431	7,829	8,117	12,084	0,764					
8,6	3,762	4,404	5,091	5,791	6,467	7,081	7,602	8,013	8,309	12,044	0,766					
8,8	3,817	4,476	5,133	5,905	6,602	7,235	7,773	8,196	8,502	12,006	0,769					
9,0	3,871	4,548	5,275	6,019	6,737	7,389	7,944	8,380	8,694	11,970	0,771					
9,2	3,926	4,620	5,367	6,132	6,871	7,543	8,114	8,564	8,887	11,934	0,773					
9,4	3,979	4,691	5,459	6,245	7,005	7,697	8,285	8,747	9,079	11,900	0,775					
9,6	4,032	4,762	5,550	6,357	7,139	7,851	8,455	8,930	9,272	11,868	0,777					
9,8	4,084	4,832	5,640	6,469	7,272	8,004	8,625	9,114	9,464	11,834	0,779					
10	4,137	4,902	5,730	6,581	7,407	8,157	8,796	9,297	9,656	11,803	0,781					
11	4,394	5,247	6,176	7,136	8,059	8,922	9,646	10,213	10,619	11,658	0,790					
12	4,642	5,583	6,614	7,683	8,727	9,682	10,594	11,129	11,584	11,531	0,798					
13	4,883	5,911	7,044	8,224	9,380	10,439	11,339	12,043	12,543	11,419	0,805					
14	5,117	6,233	7,467	8,760	10,029	11,194	12,184	12,957	13,504	11,318	0,812					
15	5,345	6,548	7,884	9,260	10,673	11,945	13,026	13,869	14,465	11,226	0,818					
16	5,568	6,857	8,294	9,815	11,315	12,694	13,867	14,781	15,426	11,142	0,824					

Продолжение табл. 6.4

 $|\Gamma|_{\max} = 0,02, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
17	1,037	1,084	1,156	1,265	1,422	1,645	1,953	2,374	2,938	3,679	4,624
18	1,038	1,085	1,158	1,269	1,430	1,659	1,977	2,413	3,060	3,776	4,770
19	1,038	1,085	1,160	1,273	1,438	1,672	1,999	2,450	3,060	3,870	4,913
20	1,038	1,086	1,162	1,277	1,445	1,684	2,021	2,485	3,118	3,961	5,052
21	1,038	1,087	1,163	1,280	1,451	1,696	2,042	2,521	3,175	4,050	5,189
22	1,038	1,087	1,165	1,283	1,458	1,708	2,061	2,554	3,229	4,136	5,222
23	1,038	1,088	1,166	1,287	1,464	1,719	2,081	2,586	3,282	4,221	5,453
24	1,038	1,088	1,168	1,290	1,470	1,729	2,099	2,617	3,334	4,303	5,581
25	1,039	1,089	1,169	1,293	1,475	1,740	2,117	2,648	3,384	4,384	5,706
26	1,139	1,089	1,170	1,295	1,481	1,750	2,134	2,677	3,432	4,463	5,830
27	1,039	1,090	1,172	1,298	1,486	1,759	2,151	2,706	3,480	4,540	5,951
28	1,039	1,090	1,173	1,301	1,491	1,769	2,167	2,734	3,527	4,616	6,070
29	1,039	1,090	1,175	1,303	1,496	1,777	2,183	2,761	3,572	4,690	6,188
30	1,039	1,090	1,175	1,306	1,501	1,786	2,198	2,787	3,763	4,763	6,304

$|\Gamma|_{\max} = 0.02, n = 20$

R	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{1*}	ρ_{11*}	ρ_{12*}	ρ_{13*}	ρ_{14*}	ρ_{15*}	ρ_{16*}	ρ_{17*}	ρ_{18*}	ρ_{19*}	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$
17	5,785	7,161	8,704	10,336	11,952	13,440	14,707	15,693	16,387	11,065	11,065	11,065	11,065	11,065	11,065	11,065	11,065	11,065	11,065	0,829	
18	5,999	7,480	9,106	10,852	12,586	14,184	15,545	16,605	17,348	10,993	10,993	10,993	10,993	10,993	10,993	10,993	10,993	10,993	10,993	0,835	
19	6,208	7,900	9,504	11,365	13,216	14,826	16,382	17,515	18,309	10,927	10,927	10,927	10,927	10,927	10,927	10,927	10,927	10,927	10,927	0,838	
20	6,413	8,048	9,898	11,874	13,844	15,666	17,218	18,425	19,269	10,865	10,865	10,865	10,865	10,865	10,865	10,865	10,865	10,865	10,865	0,843	
21	6,615	8,331	10,286	12,379	14,469	16,404	18,053	19,335	20,227	10,807	10,807	10,807	10,807	10,807	10,807	10,807	10,807	10,807	10,807	0,847	
22	6,813	8,614	10,672	12,880	15,092	17,140	18,887	20,244	21,190	10,753	10,753	10,753	10,753	10,753	10,753	10,753	10,753	10,753	10,753	0,851	
23	7,008	8,893	11,054	13,380	15,712	17,875	19,720	21,152	22,151	10,702	10,702	10,702	10,702	10,702	10,702	10,702	10,702	10,702	10,702	0,855	
24	7,199	9,169	11,433	13,876	16,329	18,753	20,552	22,061	23,110	10,653	10,653	10,653	10,653	10,653	10,653	10,653	10,653	10,653	10,653	0,858	
25	7,388	9,442	11,809	14,369	16,945	19,339	21,383	22,968	24,071	10,607	10,607	10,607	10,607	10,607	10,607	10,607	10,607	10,607	10,607	0,862	
26	7,575	9,712	12,182	14,859	17,557	20,069	22,213	23,876	25,031	10,564	10,564	10,564	10,564	10,564	10,564	10,564	10,564	10,564	10,564	0,865	
27	7,758	9,979	12,552	15,347	18,169	20,798	23,043	24,783	25,991	10,522	10,522	10,522	10,522	10,522	10,522	10,522	10,522	10,522	10,522	0,868	
28	7,940	10,243	12,913	15,832	18,778	21,525	23,871	25,690	26,950	20,482	20,482	20,482	20,482	20,482	20,482	20,482	20,482	20,482	20,482	0,871	
29	8,119	10,504	13,284	16,343	19,385	22,261	24,599	25,596	27,910	10,445	10,445	10,445	10,445	10,445	10,445	10,445	10,445	10,445	10,445	0,874	
30	8,285	10,763	13,646	16,796	19,991	22,975	25,526	27,502	28,869	10,408	10,408	10,408	10,408	10,408	10,408	10,408	10,408	10,408	10,408	0,877	

Таблица 6.5

Расчетные параметры чебышевских переходов $|\Gamma|_{\max} = 0.05, n = 2$

R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	R	ρ_1	ρ_2	$\frac{\Delta_{-\Pi}}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{-\Pi}}$	
1,2	1,073	1,118	4,507	0,182	5,6	1,578	3,556	1,508	0,399	10	1,825	5,496	1,404	0,416	1,2	1,083	1,128	4,507	0,182	
1,4	1,115	1,256	2,792	0,264	5,8	1,592	3,651	1,501	0,401	11	1,868	5,904	1,390	0,418	1,4	1,132	1,177	4,507	0,182	
1,6	1,153	1,388	2,345	0,299	6,0	1,606	3,745	1,493	0,401	12	1,910	6,303	1,378	0,420	1,6	1,187	1,232	4,507	0,182	
1,8	1,188	1,516	2,126	0,320	6,2	1,619	3,839	1,486	0,402	13	1,949	6,693	1,368	0,422	1,8	1,222	1,287	4,507	0,182	
2,0	1,220	1,641	1,994	0,334	6,4	1,632	3,931	1,480	0,403	14	1,985	7,076	1,358	0,424	2,0	1,257	1,342	4,507	0,182	
2,2	1,249	1,763	1,903	0,345	6,6	1,644	4,023	1,474	0,404	15	2,020	7,453	1,351	0,425	2,2	1,282	1,407	4,507	0,182	
2,4	1,277	1,882	1,836	0,353	6,8	1,657	4,114	1,468	0,405	16	2,052	7,822	1,343	0,427	2,4	1,322	1,472	4,507	0,182	
2,6	1,302	1,999	1,784	0,359	7,0	1,669	4,205	1,463	0,406	17	2,083	8,187	1,336	0,428	2,6	1,357	1,542	4,507	0,182	
2,8	1,327	2,113	1,742	0,365	7,2	1,681	4,294	1,457	0,407	18	2,114	8,545	1,330	0,429	2,8	1,386	1,611	4,507	0,182	
3,0	1,350	2,225	1,709	0,369	7,4	1,692	4,384	1,452	0,408	19	2,143	8,900	1,324	0,430	3,0	1,419	1,679	4,507	0,182	
3,2	1,372	2,336	1,680	0,373	7,6	1,704	4,473	1,448	0,409	20	2,170	9,250	1,319	0,431	3,2	1,457	1,747	4,507	0,182	
3,4	1,393	2,445	1,655	0,377	7,8	1,715	4,561	1,443	0,409	21	2,197	9,595	1,314	0,432	3,4	1,486	1,816	4,507	0,182	
3,6	1,413	2,552	1,634	0,380	8,0	1,726	4,648	1,439	0,410	22	2,222	9,936	1,310	0,433	3,6	1,518	1,885	4,507	0,182	
3,8	1,432	2,658	1,615	0,382	8,2	1,736	4,735	1,435	0,411	23	2,248	10,273	1,306	0,434	3,8	1,549	1,954	4,507	0,182	
4,0	1,451	2,762	1,598	0,385	8,4	1,747	4,822	1,431	0,411	24	2,271	10,607	1,302	0,434	4,0	1,600	2,023	4,507	0,182	
4,2	1,469	2,865	1,583	0,387	8,6	1,757	4,908	1,427	0,412	25	2,295	10,937	1,298	0,435	4,2	1,649	2,092	4,507	0,182	
4,4	1,486	2,967	1,569	0,389	8,8	1,767	4,993	1,423	0,413	26	2,318	1,264	1,294	0,436	4,4	1,698	2,161	4,507	0,182	
4,6	1,502	3,068	1,557	0,391	9,0	1,777	5,078	1,420	0,413	27	2,340	1,158	1,291	0,437	4,6	1,737	2,229	4,507	0,182	
4,8	1,518	3,167	1,546	0,393	9,2	1,787	5,163	1,416	0,414	28	2,361	1,190	1,288	0,437	4,8	1,776	2,298	4,507	0,182	
5,0	1,534	3,266	1,535	0,394	9,4	1,797	5,247	1,413	0,414	29	2,382	1,228	1,285	0,438	5,0	1,815	2,367	4,507	0,182	
5,2	1,549	3,364	1,525	0,395	9,6	1,806	5,330	1,410	0,415	30	2,402	1,254	1,282	0,438	5,2	1,864	2,436	4,507	0,182	
5,4	1,564	3,460	1,517	0,397	9,8	1,815	5,414	1,407	0,416											

$\Gamma_{\max} = 0,05, n = 3$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\Delta - \pi}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta - \pi}$	R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\Delta - \pi}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta - \pi}$	
1,2	1,065	1,095	1,126	7,007	0,187	5,6	1,326	2,369	4,021	2,153	0,476	10	1,434	3,167
1,4	1,091	1,183	4,313	0,282	5,8	1,333	2,411	4,151	2,139	0,478	11	1,453	3,322	
1,6	1,113	1,265	1,437	5,587	0,327	6,0	1,339	2,452	4,081	2,125	0,480	12	1,470	3,469
1,8	1,132	1,342	1,589	3,225	0,355	6,2	1,345	2,493	4,410	2,113	0,481	13	1,486	3,611
2,0	1,150	1,415	1,739	3,001	0,375	6,4	1,351	2,532	4,138	2,101	0,484	14	1,500	3,748
2,2	1,165	1,484	1,887	2,847	0,390	6,6	1,356	2,572	4,856	2,090	0,485	15	1,514	3,880
2,4	1,193	1,550	2,034	2,732	0,419	6,8	1,362	2,611	4,993	2,079	0,487	16	1,527	4,007
2,6	1,193	1,613	2,179	2,673	0,412	7,0	1,367	2,649	5,120	2,069	0,489	17	1,540	4,130
2,8	1,206	1,674	2,322	2,571	0,420	7,2	1,372	2,687	5,247	2,059	0,490	18	1,551	4,250
3,0	1,217	1,733	2,464	2,611	0,427	7,4	1,377	2,724	5,372	2,050	0,492	19	1,563	4,367
3,2	1,228	1,790	2,605	2,460	0,433	7,6	1,382	2,760	5,998	2,040	0,494	20	1,573	4,480
3,4	1,239	1,845	2,745	2,417	0,439	7,8	1,387	2,796	5,623	2,033	0,495	21	1,583	4,591
3,6	1,258	1,899	2,883	2,379	0,444	8,0	1,392	2,832	5,747	2,024	0,496	22	1,593	4,699
3,8	1,267	1,951	3,021	2,346	0,448	8,2	1,396	2,867	5,871	2,017	0,497	23	1,603	4,805
4,0	1,275	2,001	3,157	2,315	0,452	8,4	1,401	2,902	5,995	2,009	0,498	24	1,612	4,909
4,2	1,283	2,051	3,283	2,288	0,455	8,6	1,405	2,936	6,118	2,002	0,499	25	1,620	5,010
4,4	1,291	2,099	3,428	2,264	0,459	8,8	1,410	2,970	6,241	1,995	0,500	26	1,630	5,109
4,6	1,299	2,147	3,562	2,241	0,463	9,0	1,414	3,004	6,364	1,988	0,502	27	1,637	5,207
4,8	1,306	2,193	3,696	2,221	0,466	9,2	1,418	3,037	6,486	1,982	0,503	28	1,645	5,302
5,0	1,313	2,238	3,828	2,202	0,468	9,4	1,422	3,070	6,608	1,976	0,504	29	1,653	5,396
5,2	1,320	2,326	4,091	2,184	0,471	9,6	1,426	3,103	6,730	1,970	0,505	30	1,660	5,489
5,4	1,320	2,326	4,091	2,168	0,473	9,8	1,430	3,135	6,851	1,964	0,506			

Продолжение табл. 6.5

 $\Gamma_{\max} = 0,05, n = 4$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\Delta - \pi}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta - \pi}$	R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{\Delta - \pi}{\Delta_{\Pi}}$	$\frac{I_0}{\Delta - \pi}$
1,2	1,062	1,084	1,107	1,146	1,222	1,297	1,130	1,290	0,189	7,8	1,257	2,052	3,812
1,4	1,080	1,201	1,251	1,440	1,333	1,626	1,401	0,370	0,339	8,0	1,261	2,069	3,876
1,6	1,107	1,298	1,341	1,643	1,788	1,950	1,498	0,393	0,370	8,4	1,266	2,086	3,892
1,8	1,117	1,298	1,341	1,643	1,788	1,950	1,498	0,410	0,393	8,6	1,268	2,103	3,912
2,0	1,128	1,341	1,381	1,740	2,110	2,110	1,510	0,424	0,424	8,8	1,270	2,119	4,005
2,2	1,138	1,466	1,581	1,834	2,169	2,515	2,169	0,436	0,436	9,0	1,272	2,135	4,132
2,4	1,153	1,456	1,626	2,149	2,428	3,348	2,446	0,446	0,446	9,2	1,277	2,167	4,195
2,6	1,167	1,490	2,016	2,104	2,742	3,595	3,595	0,455	0,455	9,4	1,279	2,183	4,219
2,8	1,173	1,554	2,191	2,958	3,053	3,162	3,162	0,462	0,462	9,6	1,284	2,204	4,244
3,0	1,185	1,613	2,275	3,259	3,259	3,259	3,259	0,469	0,469	9,8	1,284	2,229	4,282
3,2	1,190	1,642	2,441	3,441	3,962	3,962	3,962	0,476	0,476	1,0	1,293	2,249	4,307
3,4	1,199	1,659	2,521	4,208	3,936	3,936	3,936	0,486	0,486	1,2	1,302	2,366	4,368
3,6	1,204	1,720	2,679	4,755	3,983	3,983	3,983	0,492	0,492	6	1,307	2,429	4,441
3,8	1,208	1,745	2,769	4,972	4,252	4,252	4,252	0,498	0,498	7	1,311	2,429	4,504
4,0	1,212	1,792	2,832	5,027	4,362	4,362	4,362	0,506	0,506	16	1,319	2,429	4,568
4,2	1,216	1,792	2,907	4,425	4,252	4,252	4,252	0,512	0,512	20	1,326	2,429	4,619
4,4	1,221	1,837	3,054	5,074	4,252	4,252	4,252	0,515	0,515	21	1,336	2,429	4,653
4,6	1,231	1,880	3,059	5,226	4,252	4,252	4,252	0,518	0,518	22	1,346	2,429	4,698
4,8	1,234	1,901	3,210	5,230	4,252	4,252	4,252	0,523	0,523	23	1,351	2,429	4,742
5,0	1,241	1,921	3,340	5,171	4,252	4,252	4,252	0,527	0,527	24	1,357	2,429	4,787
5,2	1,244	1,941	3,409	5,191	4,252	4,252	4,252	0,531	0,531	25	1,360	2,429	4,831
5,4	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,535	0,535	26	1,364	2,429	4,875
5,6	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,537	0,537	27	1,368	2,429	4,919
5,8	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,541	0,541	28	1,372	2,429	4,953
6,0	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,545	0,545	29	1,376	2,429	4,987
6,2	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,549	0,549	30	1,380	2,429	5,021
6,4	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,553	0,553	31	1,384	2,429	5,055
6,6	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,557	0,557	32	1,388	2,429	5,089
6,8	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,561	0,561	33	1,392	2,429	5,123
7,0	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,565	0,565	34	1,396	2,429	5,157
7,2	1,244	1,941	3,449	5,226	4,252	4,252	4,252	0,569	0,569	35	1,400	2,429	5,191

| $T_{\max} = 0,05, n = 5$

R	ρ_1	ρ_4	ρ_5	ρ_6	$\frac{I_0}{A_{\text{III}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{II}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{I}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{II}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{I}}}$		
					A_{III}	Δ_{III}	ρ_1	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_1	ρ_4	ρ_5	ρ_6	
1,2	1,060	1,077	1,096	1,114	1,133	1,124	0,190	7,8	1,195	1,703	2,796	4,579	6,527	3,433	0,564
1,4	1,124	1,164	1,265	1,374	1,304	1,518	0,293	8,0	1,198	1,723	2,832	4,665	6,849	3,417	0,566
1,6	1,084	1,200	1,232	1,342	1,646	6,251	0,345	8,4	1,200	1,733	2,867	4,769	6,943	3,438	0,568
1,8	1,102	1,109	1,262	1,484	1,816	5,612	0,378	8,6	1,214	1,743	2,902	4,848	7,001	3,388	0,570
2,0	1,155	1,289	1,315	1,743	1,984	4,937	0,421	8,8	1,203	1,751	2,937	4,935	7,168	3,375	0,671
2,2	1,121	1,126	1,262	1,484	1,673	2,152	0,436	9,0	1,204	1,760	3,004	5,123	7,161	3,361	0,573
2,4	1,135	1,155	1,315	1,743	1,977	3,320	0,449	9,2	1,206	1,766	3,037	5,123	7,473	3,349	0,575
2,6	1,126	1,139	1,315	1,747	1,961	2,094	0,560	9,4	1,207	1,771	3,070	5,287	7,786	3,334	0,577
2,8	1,130	1,136	1,315	1,743	1,961	2,094	0,560	9,6	1,210	1,773	3,103	5,274	7,786	3,313	0,580
3,0	1,135	1,139	1,403	1,845	2,094	2,324	0,478	9,8	1,214	1,803	3,167	5,460	8,100	3,291	0,581
3,2	1,143	1,147	1,422	1,869	2,094	2,531	0,485	10,0	1,217	1,843	3,209	5,546	8,256	3,241	0,583
3,4	1,147	1,147	1,420	1,990	2,094	2,638	0,483	10,2	1,223	1,879	3,469	6,384	9,036	3,200	0,589
3,6	1,166	1,537	2,005	2,094	2,743	3,476	0,504	10,4	1,228	1,946	3,611	6,793	9,812	3,160	0,596
3,8	1,164	1,458	2,005	2,094	2,847	3,604	0,504	10,6	1,233	1,977	3,879	7,041	10,354	3,156	0,601
4,0	1,164	1,458	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	10,8	1,237	2,003	4,130	8,213	10,122	3,104	0,611
4,2	1,167	1,491	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	11,0	1,246	2,033	4,154	8,650	10,678	3,094	0,616
4,4	1,160	1,507	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	11,2	1,253	2,065	4,175	8,797	10,939	3,084	0,619
4,6	1,168	1,532	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	11,4	1,263	2,095	4,205	8,742	11,292	3,074	0,622
4,8	1,163	1,532	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	11,6	1,273	2,126	4,235	8,702	11,679	3,064	0,626
5,0	1,168	1,537	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	11,8	1,283	2,156	4,265	8,678	12,064	3,054	0,629
5,2	1,168	1,551	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	12,0	1,293	2,186	4,295	8,641	12,457	3,044	0,645
5,4	1,171	1,565	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	12,2	1,303	2,216	4,325	8,604	12,851	3,034	0,649
5,6	1,173	1,578	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	12,4	1,313	2,246	4,355	8,567	13,241	3,024	0,651
5,8	1,175	1,591	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	12,6	1,323	2,276	4,385	8,529	13,631	3,014	0,653
6,0	1,178	1,603	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	12,8	1,333	2,306	4,415	8,488	14,021	3,004	0,656
6,2	1,180	1,616	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	13,0	1,343	2,336	4,445	8,447	14,411	2,994	0,659
6,4	1,182	1,628	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	13,2	1,353	2,366	4,475	8,406	14,801	2,984	0,662
6,6	1,184	1,641	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	13,4	1,363	2,396	4,505	8,365	15,189	2,974	0,666
6,8	1,186	1,662	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	13,6	1,373	2,426	4,535	8,324	15,579	2,964	0,670
7,0	1,190	1,672	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	13,8	1,383	2,456	4,565	8,283	15,969	2,954	0,674
7,2	1,192	1,683	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	14,0	1,393	2,486	4,595	8,242	16,359	2,944	0,677
7,4	1,193	1,693	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	14,2	1,403	2,516	4,625	8,191	16,749	2,934	0,679
7,6	1,193	1,693	2,005	2,094	2,952	3,624	0,513	14,4	1,413	2,546	4,655	8,140	17,139	2,924	0,681

Приложение к табл. 6.5

| $T_{\max} = 0,05, n = 6$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{I_0}{A_{\text{III}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{II}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{I}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{II}}}$		$\frac{I_0}{A_{\text{I}}}$			
					A_{III}	Δ_{III}	ρ_1	ρ_4	ρ_3	ρ_6	ρ_1	ρ_4	ρ_3	ρ_6		
1,2	1,058	1,072	1,088	1,104	1,134	1,124	0,191	7,8	1,159	1,703	2,445	3,485	5,141	6,728	4,181	0,579
1,4	1,069	1,097	1,158	1,209	1,309	1,262	0,296	8,0	1,161	1,743	2,465	3,541	5,260	6,893	4,162	0,581
1,6	1,078	1,141	1,221	1,340	1,402	1,484	0,383	8,2	1,162	1,783	2,486	3,596	5,360	7,059	4,144	0,583
1,8	1,085	1,168	1,333	1,502	1,541	1,659	0,359	8,4	1,163	1,823	2,506	3,650	5,468	7,224	4,124	0,585
2,0	1,091	1,192	1,341	1,592	1,677	1,833	0,408	8,6	1,164	1,863	2,526	3,703	5,578	7,390	4,109	0,587
2,2	1,097	1,214	1,343	1,679	1,942	1,918	0,443	8,8	1,165	1,903	2,546	3,757	5,683	7,554	4,093	0,589
2,4	1,107	1,234	1,343	1,679	1,942	1,918	0,443	9,0	1,166	1,943	2,565	3,810	5,789	7,718	4,077	0,591
2,6	1,106	1,253	1,476	2,075	2,075	2,075	0,456	9,2	1,167	1,983	2,585	3,864	5,899	7,884	4,062	0,593
2,8	1,110	1,270	1,519	2,084	2,093	2,093	0,477	9,4	1,168	2,023	2,605	3,915	6,008	8,048	4,047	0,594
3,0	1,111	1,286	1,559	2,092	2,093	2,093	0,477	9,6	1,169	2,063	2,625	3,967	6,112	8,213	4,033	0,596
3,2	1,117	1,301	1,630	2,092	2,093	2,093	0,477	9,8	1,170	2,103	2,646	4,019	6,214	8,377	4,019	0,598
3,4	1,120	1,315	1,672	2,092	2,093	2,093	0,477	10,0	1,171	2,143	2,666	4,070	6,324	8,546	4,006	0,600
3,6	1,122	1,329	1,672	2,092	2,093	2,093	0,477	10,2	1,172	2,183	2,686	4,130	6,439	8,709	3,945	0,607
3,8	1,125	1,344	1,707	2,229	2,093	2,093	0,477	10,4	1,173	2,223	2,707	4,190	6,560	8,819	3,945	0,613
4,0	1,128	1,354	1,747	2,301	2,093	2,093	0,477	10,6	1,174	2,263	2,727	4,244	6,676	8,982	3,934	0,620
4,2	1,130	1,376	1,806	2,441	2,093	2,093	0,477	10,8	1,175	2,303	2,747	4,294	6,775	9,177	3,923	0,625
4,4	1,134	1,386	1,837	2,509	2,093	2,093	0,477	11,0	1,176	2,343	2,767	4,353	6,872	9,344	3,913	0,630
4,6	1,137	1,397	1,874	2,576	2,093	2,093	0,477	11,2	1,177	2,383	2,787	4,412	6,971	9,514	3,903	0,634
4,8	1,139	1,407	1,902	2,642	2,093	2,093	0,477	11,4	1,178	2,423	2,807	4,470	7,040	9,684	3,893	0,639
5,0	1,140	1,417	1,924	2,642	2,093	2,093	0,477	11,6	1,179	2,463	2,827	4,529	7,133	9,844	3,884	0,643
5,2	1,142	1,426	1,952	2,772	2,093	2,093	0,477	11,8	1,180	2,503	2,857	4,589	7,244	9,977	3,874	0,650
5,4	1,144	1,435	1,979	2,835	2,093	2,093	0,477	12,0	1,181	2,543	2,893	4,649	7,351	10,124	3,864	0,656
5,6	1,144	1,443	2,002	2,898	2,093	2,093	0,477	12,2	1,182	2,583	2,933	4,709	7,457	10,244	3,853	0,657
5,8	1,146	1,452	2,032	2,959	2,093	2,093	0,477	12,4	1,183	2,623	2,973	4,769	7,557	10,344	3,844	0,658
6,0	1,147	1,460	2,052	3,020	2,093	2,093	0,477	12,6	1,184	2,663	3,013	4,828	7,655	10,444	3,833	0,662
6,2	1,149	1,468	2,071	3,087	2,093	2,093	0,477	12,8	1,185	2,703	3,053	4,901	7,754	10,543	3,823	0,665
6,4	1,150	1,476	2,083	3,141	2,093	2,093	0,477	13,0	1,186	2,743	3,113	4,971	7,854	10,643	3,813	0,667
6,6																

$|\Gamma|_{\max} = 0,05, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
1,2	1,053	1,057	1,061	1,066	1,070	1,074	1,079	1,084	1,088	1,093	1,098
1,4	1,056	1,066	1,077	1,089	1,102	1,106	1,130	1,145	1,160	1,175	1,191
1,6	1,056	1,073	1,090	1,108	1,128	1,150	1,174	1,198	1,224	1,251	1,279
1,8	1,050	1,078	1,100	1,124	1,151	1,180	1,213	1,247	1,284	1,332	1,362
2,0	1,061	1,083	1,108	1,137	1,170	1,207	1,248	1,292	1,339	1,389	1,441
2,2	1,062	1,087	1,115	1,149	1,188	1,231	1,280	1,333	1,391	1,452	1,517
2,4	1,063	1,090	1,122	1,160	1,204	1,253	1,309	1,372	1,439	1,512	1,589
2,6	1,064	1,093	1,128	1,169	1,218	1,274	1,337	1,408	1,485	1,569	1,659
2,8	1,065	1,095	1,133	1,178	1,231	1,293	1,363	1,442	1,529	1,624	1,726
3,0	1,065	1,098	1,138	1,186	1,243	1,310	1,387	1,474	1,571	1,677	1,791
3,2	1,066	1,100	1,142	1,193	1,255	1,327	1,410	1,505	1,611	1,728	1,854
3,4	1,067	1,102	1,146	1,200	1,265	1,343	1,432	1,534	1,650	1,777	1,916
3,6	1,067	1,104	1,150	1,207	1,276	1,357	1,453	1,563	1,687	1,825	1,976
3,8	1,068	1,105	1,153	1,213	1,285	1,371	1,473	1,590	1,723	1,871	2,034
4,0	1,068	1,107	1,156	1,218	1,294	1,385	1,492	1,616	1,757	1,916	2,091
4,2	1,069	1,108	1,160	1,224	1,303	1,397	1,510	1,641	1,791	1,960	2,147
4,4	1,069	1,110	1,162	1,229	1,311	1,410	1,527	1,665	1,823	2,002	2,201

 $|\Gamma|_{\max} = 0,05, n = 20$

R	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	$\frac{\Delta_{12-11}}{A_{11}}$	$\frac{f_0}{A_{11}-\Pi}$
1,2	1,102	1,107	1,114	1,117	1,121	1,126	1,131	1,135	1,139	51,026	0,192
1,4	1,207	1,223	1,239	1,255	1,270	1,285	1,299	1,312	1,325	32,342	0,239
1,6	1,307	1,335	1,363	1,391	1,418	1,444	1,468	1,491	1,514	27,142	0,355
1,8	1,402	1,443	1,484	1,525	1,564	1,601	1,636	1,669	1,698	24,500	0,392
2,0	1,494	1,548	1,603	1,657	1,709	1,758	1,805	1,847	1,883	22,843	0,419
2,2	1,582	1,650	1,719	1,787	1,852	1,914	1,972	2,025	2,071	21,684	0,441
2,4	1,668	1,750	1,833	1,915	1,994	2,069	2,139	2,202	2,257	20,816	0,458
2,6	1,750	1,847	1,944	2,041	2,135	2,223	2,305	2,379	2,443	20,133	0,473
2,8	1,831	1,942	2,054	2,166	2,274	2,376	2,471	2,556	2,630	19,578	0,485
3,0	1,909	2,035	2,162	2,289	2,413	2,529	2,637	2,733	2,815	19,115	0,497
3,2	1,986	2,126	2,269	2,411	2,550	2,681	2,802	2,909	3,001	18,720	0,507
3,4	2,061	2,216	2,374	2,532	2,686	2,833	2,967	3,086	3,187	18,379	0,516
3,6	2,134	2,319	2,478	2,652	2,822	2,983	3,131	3,262	3,373	18,080	0,524
3,8	2,206	2,390	2,580	2,771	2,957	3,133	3,295	3,438	3,559	17,813	0,531
4,0	2,276	2,476	2,681	2,888	3,091	3,283	3,459	3,614	3,745	17,575	0,538
4,2	2,345	2,560	2,782	3,005	3,224	3,432	3,622	3,789	3,931	17,360	0,544
4,4	2,413	2,643	2,881	3,121	3,357	3,580	3,785	3,965	4,116	17,164	0,551

|Г_{макс} — 0,05, n = 20

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_6	ρ_8	ρ_{11}	ρ_{14}	ρ_{16}	ρ_{18}	ρ_{21}	ρ_{24}	ρ_{26}	ρ_{29}	ρ_{31}
4,6	1,069	1,111	1,165	1,234	1,318	1,421	1,544	1,688	1,855	2,044	2,255				
4,8	1,070	1,112	1,168	1,238	1,326	1,433	1,560	1,711	1,886	2,085	2,307				
5,0	1,070	1,113	1,170	1,243	1,333	1,443	1,576	1,733	1,916	2,124	2,358				
5,2	1,070	1,114	1,173	1,247	1,340	1,454	1,591	1,754	1,945	2,163	2,409				
5,4	1,070	1,115	1,175	1,251	1,347	1,464	1,606	1,775	1,973	2,201	2,458				
5,6	1,070	1,116	1,177	1,255	1,353	1,474	1,620	1,796	2,001	2,238	2,507				
5,8	1,071	1,117	1,179	1,259	1,359	1,483	1,634	1,815	2,026	2,275	2,555				
6,0	1,071	1,118	1,181	1,262	1,365	1,492	1,648	1,834	2,055	2,311	2,602				
6,2	1,071	1,119	1,183	1,266	1,371	1,501	1,661	1,853	2,081	2,346	2,649				
6,4	1,072	1,120	1,185	1,269	1,376	1,510	1,674	1,872	2,107	2,381	2,694				
6,6	1,072	1,121	1,187	1,272	1,382	1,518	1,686	1,889	2,132	2,415	2,739				
6,8	1,072	1,122	1,188	1,276	1,387	1,526	1,698	1,907	2,156	2,448	2,784				
7,0	1,072	1,123	1,190	1,279	1,392	1,534	1,710	1,924	2,180	2,481	2,828				
7,2	1,072	1,123	1,192	1,282	1,397	1,542	1,722	1,941	2,204	2,514	2,871				
7,4	1,073	1,124	1,193	1,285	1,402	1,550	1,733	1,957	2,227	2,546	2,914				
7,6	1,073	1,125	1,195	1,287	1,406	1,567	1,744	1,974	2,250	2,577	2,956				

Продолжение табл. 6.5

|Г_{макс} — 0,05, n = 20

R	ρ_{13}	ρ_{15}	ρ_{14}	ρ_{16}	ρ_{18}	ρ_{17}	ρ_{19}	ρ_{21}	ρ_{20}	ρ_{24}	ρ_{26}	$\frac{\Delta_{\text{ макс}}}{\Delta_{\text{ II}}}$	$\frac{l_n}{\Delta - \Omega}$
4,6	2,480	2,724	2,979	3,230	3,489	3,728	3,948	4,144	4,302	16,985	0,556		
4,8	2,545	2,805	3,079	3,350	3,620	3,876	4,110	4,316	4,489	16,820	0,561		
5,0	2,610	2,885	3,172	3,464	3,750	4,023	4,272	4,491	4,673	16,667	0,566		
5,2	2,674	2,964	3,267	3,576	3,880	4,170	4,434	4,666	4,858	16,525	0,571		
5,4	2,736	3,042	3,362	3,688	4,010	4,316	4,595	4,841	5,046	16,393	0,575		
5,6	2,798	3,119	3,456	3,800	4,139	4,462	4,757	5,015	5,230	16,270	0,579		
5,8	2,862	3,195	3,549	3,910	4,267	4,607	4,918	5,189	5,415	16,154	0,583		
6,0	2,920	3,271	3,641	4,020	4,395	4,753	5,079	5,364	5,601	16,044	0,587		
6,2	2,979	3,345	3,733	4,130	4,523	4,897	5,240	5,539	5,786	15,941	0,590		
6,4	3,038	3,419	3,824	4,239	4,650	5,042	5,401	5,713	5,972	15,843	0,594		
6,6	3,096	3,492	3,914	4,347	4,776	5,186	5,562	5,887	6,157	15,751	0,597		
6,8	3,154	3,566	4,004	4,455	4,903	5,330	5,721	6,062	6,342	15,662	0,600		
7,0	3,211	3,638	4,093	4,562	5,028	5,474	5,881	6,236	6,528	15,579	0,603		
7,2	3,266	3,709	4,181	4,668	5,154	5,617	6,041	6,409	6,713	15,500	0,606		
7,4	3,323	3,780	4,269	4,781	5,279	5,760	6,200	6,583	6,898	15,422	0,609		
7,6	3,378	3,851	4,357	4,881	5,403	5,903	6,359	6,757	7,083	15,349	0,612		

$|I|^{\max} = 0,05, n = 20$

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}
7,8	1,073	1,125	1,196	1,290	1,411	1,564	1,755	1,989	2,272	2,608	2,998			
8,0	1,073	1,126	1,198	1,293	1,415	1,571	1,766	2,005	2,295	2,639	2,940			
8,2	1,073	1,127	1,199	1,295	1,420	1,578	1,776	2,020	2,316	2,669	3,080			
8,4	1,074	1,127	1,201	1,298	1,424	1,585	1,786	2,035	2,338	2,699	3,121			
8,6	1,074	1,128	1,202	1,300	1,428	1,591	1,796	2,050	2,359	2,728	3,161			
8,8	1,074	1,128	1,203	1,303	1,432	1,598	1,806	2,065	2,380	2,757	3,200			
9,0	1,074	1,129	1,204	1,305	1,436	1,604	1,816	2,079	2,400	2,786	3,236			
9,2	1,074	1,130	1,206	1,307	1,440	1,610	1,825	2,098	2,420	2,844	3,278			
9,4	1,074	1,130	1,207	1,310	1,444	1,616	1,835	2,107	2,440	2,842	3,316			
9,6	1,074	1,131	1,208	1,312	1,448	1,622	1,844	2,120	2,460	2,870	3,354			
9,8	1,075	1,131	1,209	1,314	1,451	1,628	1,853	2,134	2,479	2,897	3,392			
10	1,075	1,132	1,206	1,316	1,455	1,634	1,862	2,147	2,500	2,924	3,429			
11	1,075	1,134	1,214	1,326	1,472	1,661	1,904	2,210	2,591	3,055	3,611			
12	1,076	1,136	1,215	1,326	1,487	1,686	1,943	2,270	2,678	3,180	3,784			
13	1,076	1,138	1,220	1,335	1,501	1,710	1,980	2,325	2,761	3,300	3,953			
14	1,077	1,140	1,228	1,351	1,515	1,732	2,014	2,378	2,839	3,414	4,114			
15	1,077	1,141	1,232	1,358	1,527	1,752	2,047	2,428	2,915	3,524	4,271			
16	1,078	1,142	1,236	1,364	1,539	1,771	2,078	2,476	2,987	3,630	4,423			

 $|\Gamma|^{\max} = 0,05, n = 20$

Продолжение табл. 6.5

R	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	$\frac{A_{\text{вн}} - \Pi}{A_{\text{вн}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{вн}}}$
7,8	3,432	3,920	4,444	4,986	5,528	6,046	6,519	6,931	7,269	15,279	0,614			
8,0	3,486	3,990	4,530	5,091	5,651	6,189	6,678	7,104	7,454	15,211	0,617			
8,2	3,972	4,059	4,616	5,196	5,775	6,330	6,837	7,278	7,639	15,147	0,619			
8,4	3,562	4,127	4,702	5,299	5,898	6,471	6,996	7,452	7,824	15,084	0,622			
8,6	3,646	4,194	4,787	5,404	6,021	6,613	7,155	7,625	8,009	15,024	0,624			
8,8	3,698	4,262	4,872	5,507	6,143	6,754	7,314	7,798	8,194	14,966	0,626			
9,0	3,750	4,329	4,956	5,610	6,266	6,896	7,472	7,972	8,380	14,911	0,628			
9,2	3,801	4,397	5,040	5,713	6,388	7,036	7,630	8,145	8,564	14,857	0,630			
9,4	3,852	4,462	5,123	5,815	6,510	7,177	7,788	8,318	8,750	14,804	0,633			
9,6	3,902	4,527	5,206	5,915	6,631	7,318	7,946	8,491	8,934	14,754	0,635			
9,8	3,952	4,593	5,289	6,018	6,752	7,458	8,104	8,664	9,120	14,705	0,637			
10	4,001	4,658	5,371	6,120	6,873	7,598	8,262	8,837	9,305	14,657	0,639			
11	4,246	4,977	5,777	6,621	7,474	8,296	9,049	9,701	10,229	14,440	0,648			
12	4,380	5,287	6,175	7,115	8,068	8,989	9,833	10,564	11,154	14,250	0,656			
13	4,709	5,590	6,566	7,603	8,658	9,679	10,616	11,425	12,078	14,081	0,663			
14	4,930	5,886	6,950	8,085	9,242	10,365	11,395	12,383	13,002	13,930	0,670			
15	5,146	6,177	7,328	8,560	9,822	11,048	12,113	13,144	13,925	13,794	0,676			
16	5,357	6,461	7,700	9,032	10,398	11,727	12,949	14,003	14,848	13,670	0,682			

344

卷二

R	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}
17	1,078	1,144	1,239	1,370	1,550	1,790	2,107	2,522	3,056	3,732	4,571
18	1,078	1,145	1,242	1,376	1,560	1,807	2,135	2,566	3,123	3,832	4,714
19	1,079	1,147	1,244	1,382	1,570	1,823	2,162	2,608	3,187	3,928	4,855
20	1,079	1,148	1,247	1,387	1,579	1,839	2,187	2,648	3,250	4,022	4,992
21	1,079	1,149	1,250	1,392	1,588	1,854	2,212	2,687	3,310	4,113	5,125
22	1,079	1,150	1,252	1,396	1,596	1,869	2,236	2,725	3,369	4,202	5,256
23	1,080	1,151	1,254	1,401	1,604	1,883	2,259	2,762	3,426	4,288	5,384
24	1,080	1,152	1,256	1,405	1,612	1,896	2,281	2,797	3,481	4,373	5,510
25	1,080	1,152	1,259	1,409	1,620	1,909	2,302	2,831	3,535	4,455	5,634
26	1,080	1,153	1,260	1,413	1,627	1,921	2,323	2,865	3,588	4,536	5,755
27	1,080	1,154	1,262	1,417	1,634	1,933	2,343	2,897	3,639	4,616	5,874
28	1,081	1,155	1,264	1,421	1,641	1,945	2,362	2,929	3,693	4,693	5,990
29	1,081	1,156	1,266	1,424	1,647	1,956	2,381	2,960	3,738	4,769	6,106
30	1,081	1,156	1,268	1,428	1,653	1,967	2,399	2,990	3,786	4,844	6,219

12B, Зак. 782

$$|\Gamma|_{\text{max}} = 0,05, \quad n = 20$$

R	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	ρ_{18}	ρ_{19}	ρ_{20}	$\frac{\Delta - \pi}{\Delta \pi}$	$\frac{f_9}{A - \eta}$
17	5,562	6,741	8,068	9,498	10,970	12,405	13,723	14,859	15,771	13,556	0,687
18	5,764	7,015	8,430	9,961	11,539	13,079	14,496	15,716	16,694	13,452	0,692
19	5,961	7,285	8,788	10,420	12,104	13,751	15,266	16,570	17,616	13,355	0,696
20	6,154	7,551	9,143	10,874	12,665	14,420	16,035	17,427	18,539	13,264	0,701
21	6,344	7,814	9,493	11,325	13,225	15,086	16,804	18,281	19,461	13,180	0,705
22	6,530	8,073	9,840	11,773	13,781	15,754	17,570	19,135	20,382	13,100	0,709
23	6,714	8,328	10,183	12,217	14,335	16,416	18,336	19,988	21,304	13,026	0,712
24	6,894	8,580	10,523	12,658	14,886	17,077	19,100	20,841	22,221	12,955	0,716
25	7,072	8,830	10,860	13,097	15,434	17,737	19,863	21,693	23,147	12,889	0,720
26	7,247	9,076	11,194	13,533	15,981	18,395	20,625	22,545	24,069	12,826	0,723
27	7,299	9,319	11,525	13,966	16,525	19,051	22,178	23,395	24,989	12,765	0,726
28	7,581	9,560	11,854	14,397	17,067	19,705	22,937	24,246	25,911	12,708	0,729
29	7,758	9,798	12,179	14,825	17,606	20,358	22,905	25,096	26,831	12,654	0,732
30	7,924	10,035	12,503	15,251	18,145	21,010	23,663	25,945	27,752	12,601	0,735

Таблица 6.6

Волновые сопротивления переходов с максимально плоской
частотной характеристикой

 $n = 2$

R	p_1	p_2	R	p_1	p_2	R	p_1	p_2
1,2	1,046	1,146	5,6	1,538	3,640	10	1,778	5,623
1,4	1,088	1,287	5,8	1,552	3,737	11	1,821	6,040
1,6	1,124	1,423	6,0	1,565	3,834	12	1,861	6,447
1,8	1,158	1,554	6,2	1,578	3,929	13	1,899	6,846
2,0	1,189	1,682	6,4	1,590	4,024	14	1,934	7,238
2,2	1,218	1,806	6,6	1,603	4,118	15	1,968	7,622
2,4	1,245	1,928	6,8	1,615	4,211	16	2,000	8,000
2,6	1,270	2,047	7,0	1,626	4,303	17	2,030	8,372
2,8	1,293	2,164	7,2	1,638	4,395	18	2,060	8,739
3,0	1,316	2,279	7,4	1,649	4,487	19	2,088	9,100
3,2	1,337	2,392	7,6	1,660	4,577	20	2,115	9,457
3,4	1,368	2,504	7,8	1,671	4,667	21	2,141	9,810
3,6	1,377	2,613	8,0	1,682	4,757	22	2,166	10,158
3,8	1,396	2,722	8,2	1,692	4,846	23	2,190	10,502
4,0	1,414	2,828	8,4	1,702	4,934	24	2,213	10,843
4,2	1,431	2,934	8,6	1,712	5,022	25	2,236	11,180
4,4	1,448	3,038	8,8	1,722	5,109	26	2,258	11,514
4,6	1,464	3,141	9,0	1,732	5,196	27	2,279	11,844
4,8	1,480	3,242	9,2	1,741	5,282	28	2,300	12,172
5,0	1,495	3,344	9,4	1,751	5,368	29	2,320	12,497
5,2	1,510	3,443	9,6	1,760	5,454	30	2,340	12,819
5,4	1,524	3,542	9,8	1,769	5,539			

 $n = 3$

R	p_1	p_2	p_3	R	p_1	p_2	p_3	R	p_1	p_2	p_3
1,2	1,018	1,095	1,178	3,8	1,151	1,949	3,302	6,4	1,222	2,530	5,238
1,4	1,035	1,183	1,353	4,0	1,157	2,000	3,456	6,6	1,226	2,569	5,382
1,6	1,049	1,265	1,525	4,2	1,164	2,049	3,608	6,8	1,231	2,608	5,525
1,8	1,062	1,342	1,695	4,4	1,170	2,098	3,761	7,0	1,235	2,646	5,668
2,0	1,073	1,414	1,863	4,6	1,176	2,145	3,911	7,2	1,239	2,683	5,811
2,2	1,084	1,483	2,029	4,8	1,182	2,191	4,062	7,4	1,243	2,720	5,953
2,4	1,094	1,549	2,193	5,0	1,187	2,236	4,211	7,6	1,247	2,757	6,094
2,6	1,104	1,612	2,355	5,2	1,193	2,280	4,360	7,8	1,251	2,793	6,235
2,8	1,113	1,673	2,516	5,4	1,198	2,324	4,508	8,0	1,255	2,828	6,375
3,0	1,121	1,732	2,676	5,6	1,203	2,366	4,655	8,2	1,258	2,863	6,516
3,2	1,129	1,789	2,834	5,8	1,208	2,408	4,802	8,4	1,262	2,898	6,655
3,4	1,137	1,844	2,991	6,0	1,213	2,449	4,948	8,6	1,265	2,932	6,794
3,6	1,144	1,897	3,147	6,2	1,217	2,490	5,093	8,8	1,269	2,966	6,932

Продолжение табл. 6.6

R	p_1	p_2	p_3	R	p_1	p_2	p_3	R	p_1	p_2	p_3
9,0	1,273	3,000	7,070	14	1,345	3,742	10,409	23	1,435	4,796	16,027
9,2	1,276	3,033	7,208	15	1,357	3,873	11,054	24	1,443	4,899	16,628
9,4	1,280	3,066	7,346	16	1,368	4,000	11,693	25	1,451	5,000	17,227
9,6	1,283	3,098	7,483	17	1,379	4,123	12,328	26	1,459	5,099	17,822
9,8	1,286	3,130	7,619	18	1,389	4,243	12,956	27	1,466	5,196	18,413
10	1,289	3,162	7,755	19	1,399	4,359	13,379	28	1,474	5,291	19,001
11	1,305	3,316	8,431	20	1,408	4,472	14,197	29	1,481	5,385	19,587
12	1,319	3,464	9,098	21	1,418	4,582	14,812	30	1,487	5,477	20,169
13	1,332	3,605	9,757	22	1,426	4,690	15,421				

 $n = 4$

R	p_1	p_2	p_3	p_4	R	p_1	p_2	p_3	p_4
1,2	1,011	1,059	1,133	1,186	7,8	1,141	1,908	4,088	6,832
1,4	1,021	1,111	1,260	1,371	8,0	1,143	1,923	4,160	6,996
1,6	1,029	1,158	1,381	1,554	8,2	1,145	1,938	4,230	7,158
1,8	1,037	1,202	1,498	1,735	8,4	1,147	1,953	4,300	7,321
2,0	1,044	1,242	1,610	1,915	8,6	1,149	1,968	4,370	7,483
2,2	1,050	1,280	1,719	2,094	8,8	1,151	1,982	4,439	7,645
2,4	1,056	1,315	1,825	2,271	9,0	1,153	1,997	4,507	7,808
2,6	1,062	1,348	1,928	2,448	9,2	1,154	2,011	4,575	7,968
2,8	1,067	1,380	2,028	2,624	9,4	1,156	2,024	4,643	8,129
3,0	1,072	1,410	2,127	2,799	9,6	1,158	2,038	4,710	8,290
3,2	1,079	1,439	2,223	2,973	9,8	1,160	2,052	4,776	8,451
3,4	1,080	1,467	2,317	3,147	10	1,161	2,065	4,842	8,611
3,6	1,084	1,494	2,410	3,320	11	1,169	2,129	5,167	9,409
3,8	1,088	1,519	2,501	3,492	12	1,176	2,189	5,481	10,202
4,0	1,092	1,544	2,590	3,663	13	1,182	2,246	5,788	10,990
4,2	1,095	1,568	2,678	3,834	14	1,189	2,300	6,086	11,773
4,4	1,099	1,591	2,765	4,004	15	1,195	2,352	6,378	12,551
4,6	1,102	1,614	2,850	4,174	16	1,201	2,401	6,663	13,326
4,8	1,105	1,636	2,934	4,344	17	1,206	2,449	6,942	14,097
5,0	1,108	1,657	3,018	4,512	18	1,211	2,494	7,216	14,864
5,2	1,111	1,677	3,100	4,681	19	1,216	2,538	7,485	15,628
5,4	1,114	1,698	3,181	4,849	20	1,220	2,581	7,750	16,389
5,6	1,116	1,717	3,261	5,016	21	1,225	2,622	8,010	17,146
5,8	1,119	1,736	3,340	5,183	22	1,228	2,622	8,265	17,900
6,0	1,121	1,755	3,418	5,350	23	1,233	2,700	8,517	18,653
6,2	1,124	1,774	3,496	5,516	24	1,237	2,738	8,766	19,402
6,4	1,126	1,791	3,572	5,682	25	1,241	2,774	9,011	20,149
6,6	1,129	1,809	3,648	5,847	26	1,244	2,810	9,252	20,893
6,8	1,131	1,826	3,723	6,012	27	1,248	2,845	9,490	21,634
7,0	1,133	1,843	3,797	6,177	28	1,251	2,872	9,726	22,374
7,2	1,135	1,860	3,871	6,341	29	1,255	2,912	9,959	23,111
7,4	1,135	1,880	3,871	6,341	30	1,258	2,944	10,189	23,847
7,6	1,139	1,892	4,017	6,669					

12B*

Таблица 6.7

Длина и перекрытие диапазона перехода с максимально плоской частотной характеристикой
 $n = 2$

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,1$	
	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-H}}$	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-P}}$	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-P}}$
1,2	1,899	0,345	3,263	0,235	—	0,097
1,4	1,576	0,388	2,150	0,317	3,551	0,221
1,6	1,462	0,406	1,873	0,348	2,645	0,275
1,8	1,400	0,417	1,735	0,366	2,302	0,303
2,0	1,361	0,423	1,651	0,377	2,115	0,321
2,2	1,333	0,429	1,593	0,386	1,995	0,334
2,4	1,312	0,432	1,551	0,392	1,910	0,344
2,6	1,295	0,436	1,518	0,397	1,846	0,352
2,8	1,282	0,438	1,492	0,401	1,795	0,358
3,0	1,270	0,440	1,470	0,405	1,755	0,363
3,2	1,261	0,442	1,451	0,408	1,721	0,368
3,4	1,253	0,444	1,436	0,411	1,692	0,372
3,6	1,245	0,445	1,422	0,413	1,667	0,375
3,8	1,239	0,446	1,410	0,415	1,646	0,378
4,0	1,233	0,448	1,399	0,417	1,627	0,381
4,2	1,228	0,449	1,389	0,418	1,610	0,383
4,4	1,223	0,450	1,381	0,420	1,594	0,386
4,6	1,219	0,451	1,373	0,421	1,580	0,388
4,8	1,215	0,451	1,365	0,423	1,568	0,390
5,0	1,211	0,452	1,358	0,424	1,556	0,391
5,2	1,208	0,453	1,352	0,425	1,546	0,393
5,4	1,205	0,454	1,347	0,426	1,536	0,395
5,6	1,202	0,454	1,341	0,427	1,530	0,396
5,8	1,199	0,455	1,336	0,428	1,518	0,397
6,0	1,196	0,455	1,331	0,429	1,510	0,398
6,2	1,194	0,456	1,327	0,430	1,503	0,400
6,4	1,191	0,456	1,323	0,430	1,495	0,401
6,6	1,189	0,457	1,319	0,431	1,489	0,402
6,8	1,187	0,457	1,315	0,432	1,483	0,403
7,0	1,185	0,458	1,311	0,433	1,476	0,404
7,2	1,183	0,458	1,308	0,433	1,471	0,405
7,4	1,181	0,458	1,305	0,434	1,466	0,406
7,6	1,180	0,459	1,302	0,434	1,460	0,407
7,8	1,178	0,459	1,299	0,435	1,455	0,408
8,0	1,177	0,459	1,299	0,435	1,451	0,409
8,2	1,175	0,460	1,293	0,436	1,446	0,410
8,4	1,174	0,460	1,291	0,436	1,442	0,411
8,6	1,172	0,460	1,288	0,437	1,438	0,412
8,8	1,171	0,461	1,286	0,437	1,434	0,413
9,0	1,169	0,461	1,283	0,438	1,430	0,414
9,2	1,168	0,461	1,281	0,438	1,427	0,415

Продолжение табл. 6.7

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,1$	
	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-H}}$	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-P}}$	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-P}}$
9,4	1,167	0,461	1,279	0,439	1,423	0,413
9,6	1,166	0,462	1,277	0,439	1,420	0,413
9,8	1,165	0,462	1,275	0,440	1,416	0,414
10	1,164	0,462	1,273	0,440	1,413	0,414
11	1,159	0,463	1,264	0,442	1,399	0,417
12	1,154	0,464	1,256	0,443	1,386	0,419
13	1,150	0,465	1,250	0,444	1,375	0,421
14	1,147	0,466	1,243	0,446	1,366	0,423
15	1,144	0,466	1,238	0,447	1,357	0,424
16	1,141	0,467	1,233	0,448	1,348	0,426
17	1,138	0,468	1,229	0,449	1,342	0,427
18	1,136	0,468	1,225	0,449	1,336	0,428
19	1,134	0,469	1,221	0,450	1,330	0,429
20	1,132	0,469	1,217	0,451	1,324	0,430
21	1,130	0,469	1,214	0,452	1,319	0,431
22	1,128	0,470	1,211	0,452	1,315	0,432
23	1,127	0,470	1,208	0,453	1,310	0,433
24	1,125	0,470	1,206	0,453	1,306	0,434
25	1,123	0,471	1,203	0,454	1,302	0,434
26	1,122	0,471	1,201	0,454	1,298	0,435
27	1,121	0,471	1,199	0,455	1,295	0,436
28	1,120	0,472	1,196	0,455	1,291	0,436
29	1,118	0,472	1,194	0,456	1,288	0,437
30	1,117	0,472	1,192	0,456	1,285	0,438

 $n = 3$

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,1$	
	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-H}}$	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-P}}$	$\frac{A_{-H}}{A_{-P}}$	$\frac{I_0}{A_{-P}}$
1,2	2,401	0,441	4,133	0,292	—	0,118
1,4	1,970	0,505	2,735	0,402	4,493	0,274
1,6	1,813	0,533	2,367	0,446	3,357	0,345
1,8	1,726	0,550	2,185	0,471	2,922	0,383
2,0	1,670	0,562	2,072	0,488	2,682	0,408
2,2	1,629	0,570	1,994	0,501	2,526	0,426
2,4	1,598	0,577	1,937	0,511	2,415	0,440
2,6	1,573	0,583	1,891	0,519	2,331	0,451
2,8	1,553	0,587	1,855	0,525	2,265	0,460
3,0	1,530	0,591	1,824	0,531	2,211	0,468
3,2	1,522	0,595	1,799	0,536	2,170	0,474
3,4	1,509	0,598	1,776	0,540	2,127	0,480
3,6	1,498	0,600	1,757	0,544	2,094	0,485
3,8	1,488	0,603	1,740	0,547	2,065	0,490

Продолжение табл. 6.7

R	Γ _{макс} = 0, 02		Γ _{макс} = 0, 05		Γ _{макс} = 0, 1	
	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{ш}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$
4,0	1,479	0,605	1,724	0,551	2,039	0,494
4,2	1,471	0,607	1,711	0,553	2,016	0,498
4,4	1,463	0,609	1,699	0,556	1,996	0,501
4,6	1,456	0,611	1,686	0,558	1,976	0,504
4,8	1,450	0,612	1,676	0,561	1,959	0,507
5,0	1,444	0,614	1,666	0,563	1,944	0,510
5,2	1,439	0,615	1,657	0,564	1,929	0,512
5,4	1,434	0,616	1,649	0,566	1,915	0,515
5,6	1,429	0,617	1,641	0,568	1,903	0,517
5,8	1,425	0,618	1,634	0,570	1,891	0,519
6,0	1,421	0,620	1,627	0,571	1,880	0,521
6,2	1,417	0,621	1,620	0,572	1,870	0,523
6,4	1,413	0,622	1,614	0,574	1,860	0,525
6,6	1,409	0,622	1,608	0,575	1,851	0,526
6,8	1,406	0,623	1,603	0,576	1,842	0,528
7,0	1,403	0,624	1,597	0,577	1,834	0,530
7,2	1,400	0,625	1,592	0,579	1,826	0,531
7,4	1,397	0,626	1,587	0,580	1,818	0,533
7,6	1,394	0,626	1,583	0,581	1,811	0,534
7,8	1,391	0,627	1,578	0,582	1,804	0,535
8,0	1,389	0,628	1,574	0,583	1,798	0,536
8,2	1,386	0,628	1,570	0,584	1,791	0,538
8,4	1,384	0,629	1,566	0,584	1,785	0,539
8,6	1,381	0,630	1,563	0,585	1,780	0,540
8,8	1,379	0,630	1,559	0,586	1,774	0,541
9,0	1,377	0,631	1,555	0,587	1,769	0,542
9,2	1,375	0,631	1,552	0,588	1,763	0,543
9,4	1,373	0,632	1,549	0,588	1,759	0,544
9,6	1,371	0,632	1,546	0,589	1,754	0,545
9,8	1,369	0,633	1,543	0,590	1,749	0,546
10	1,367	0,634	1,540	0,591	1,744	0,547
11	1,359	0,636	1,526	0,594	1,724	0,551
12	1,351	0,638	1,514	0,596	1,706	0,554
13	1,345	0,640	1,504	0,599	1,691	0,558
14	1,339	0,641	1,495	0,601	1,677	0,561
15	1,334	0,643	1,486	0,603	1,664	0,563
16	1,329	0,644	1,479	0,605	1,653	0,566
17	1,325	0,645	1,472	0,607	1,643	0,568
18	1,321	0,646	1,466	0,608	1,633	0,570
19	1,317	0,647	1,460	0,610	1,624	0,572
20	1,313	0,648	1,454	0,611	1,616	0,573
21	1,310	0,649	1,449	0,612	1,609	0,575
22	1,307	0,650	1,444	0,614	1,602	0,577
23	1,304	0,651	1,440	0,615	1,595	0,578

Продолжение табл. 6.7

R	Γ _{макс} = 0, 02		Γ _{макс} = 0, 05		Γ _{макс} = 0, 1	
	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{ш}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$
24	1,301	0,652	1,436	0,616	1,589	0,580
25	1,299	0,652	1,432	0,617	1,583	0,581
26	1,296	0,653	1,428	0,618	1,578	0,582
27	1,294	0,654	1,424	0,619	1,572	0,583
28	1,291	0,654	1,421	0,620	1,567	0,584
29	1,290	0,655	1,417	0,620	1,563	0,585
30	1,288	0,656	1,414	0,621	1,558	0,587
<i>n = 4</i>						
R	Γ _{макс} = 0, 02		Γ _{макс} = 0, 05		Γ _{макс} = 0, 1	
	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$	$\frac{A_{\text{ш-п}}}{A_{\text{ш}}}$	$\frac{I_0}{A_{\text{ш-п}}}$
1,2	2,844	0,520	4,878	0,340	—	0,136
1,4	2,328	0,601	3,238	0,472	5,297	0,319
1,6	2,139	0,638	2,803	0,526	3,971	0,403
1,8	2,030	0,660	2,586	0,558	3,460	0,449
2,0	1,960	0,676	2,451	0,580	3,176	0,480
2,2	1,909	0,687	2,357	0,596	2,992	0,502
2,4	1,871	0,697	2,287	0,609	2,860	0,519
2,6	1,840	0,704	2,232	0,619	2,761	0,532
2,8	1,815	0,710	2,187	0,627	2,681	0,544
3,0	1,793	0,716	2,150	0,635	2,617	0,554
3,2	1,775	0,721	2,119	0,641	2,563	0,562
3,4	1,759	0,725	2,091	0,647	2,517	0,569
3,6	1,745	0,729	2,068	0,652	2,477	0,576
3,8	1,732	0,732	2,047	0,656	2,442	0,582
4,0	1,720	0,735	2,028	0,660	2,411	0,587
4,2	1,710	0,738	2,011	0,664	2,383	0,592
4,4	1,701	0,740	1,995	0,668	2,358	0,596
4,6	1,692	0,743	1,981	0,671	2,335	0,600
4,8	1,684	0,745	1,967	0,674	2,315	0,604
5,0	1,677	0,747	1,956	0,677	2,299	0,607
5,2	1,670	0,749	1,945	0,679	2,278	0,611
5,4	1,663	0,751	1,934	0,682	2,261	0,614
5,6	1,657	0,753	1,924	0,684	2,246	0,617
5,8	1,651	0,754	1,915	0,686	2,231	0,619
6,0	1,646	0,756	1,907	0,688	2,218	0,622
6,2	1,641	0,757	1,899	0,690	2,206	0,624
6,4	1,636	0,759	1,891	0,692	2,194	0,627
6,6	1,631	0,760	1,884	0,694	2,182	0,629
6,8	1,627	0,761	1,876	0,695	2,172	0,631
7,0	1,623	0,762	1,870	0,697	2,162	0,633

Продолжение табл. 6.7

R	Γ _{макс} = 0, 02		Γ _{макс} = 0, 05		Γ _{макс} = 0, 1	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_n}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_n}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_n}$
7,2	1,619	0,764	1,864	0,698	2,152	0,635
7,4	1,615	0,765	1,858	0,700	2,143	0,637
7,6	1,611	0,766	1,852	0,701	2,134	0,639
7,8	1,608	0,767	1,846	0,703	1,126	0,640
8,0	1,604	0,768	1,841	0,704	2,118	0,642
8,2	1,601	0,769	1,836	0,705	2,110	0,643
8,4	1,598	0,770	1,831	0,706	2,103	0,645
8,6	1,595	0,771	1,826	0,708	2,096	0,646
8,8	1,592	0,771	1,822	0,709	2,089	0,648
9,0	1,589	0,772	1,818	0,710	2,082	0,649
9,2	1,587	0,773	1,813	0,711	2,076	0,654
9,4	1,584	0,774	1,809	0,712	2,070	0,652
9,6	1,581	0,775	1,805	0,713	2,064	0,653
9,8	1,579	0,775	1,801	0,714	2,058	0,654
10	1,577	0,776	1,798	0,715	2,052	0,656
11	1,565	0,779	1,781	0,719	2,027	0,661
12	1,556	0,782	1,766	0,723	2,005	0,666
13	1,547	0,785	1,753	0,727	1,986	0,670
14	1,539	0,787	1,741	0,730	1,969	0,674
15	1,532	0,790	1,730	0,732	1,953	0,678
16	1,526	0,792	1,721	0,735	1,939	0,681
17	1,520	0,793	1,712	0,737	1,920	0,684
18	1,514	0,795	1,704	0,740	1,915	0,686
19	1,510	0,796	1,696	0,742	1,904	0,689
20	1,505	0,798	1,689	0,743	1,894	0,691
21	1,501	0,800	1,683	0,745	1,884	0,694
22	1,497	0,801	1,676	0,747	1,876	0,696
23	1,493	0,802	1,671	0,749	1,867	0,698
24	1,489	0,803	1,665	0,750	1,860	0,700
25	1,486	0,804	1,660	0,752	1,852	0,701
26	1,482	0,806	1,655	0,753	1,845	0,703
27	1,479	0,807	1,651	0,755	1,839	0,705
28	1,476	0,808	1,646	0,756	1,833	0,706
29	1,473	0,808	1,642	0,757	1,827	0,708
30	1,471	0,809	1,638	0,758	1,821	0,709

Продолжение табл. 6.7

n = 5

R	Γ _{макс} = 0, 02		Γ _{макс} = 0, 05		Γ _{макс} = 0, 1	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_n}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_n}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_n}$
1,2	3,243	0,589	5,539	0,383	—	0,152
1,4	2,654	0,684	3,691	0,533	6,010	0,358
1,6	2,434	0,728	3,197	0,596	4,517	0,454
1,8	2,311	0,755	2,949	0,633	3,940	0,507
2,0	2,230	0,774	2,795	0,659	3,620	0,542
2,2	2,171	0,788	2,687	0,678	3,411	0,568
2,4	2,126	0,800	2,607	0,693	3,261	0,587
2,6	2,090	0,809	2,544	0,706	3,148	0,603
2,8	2,060	0,817	2,492	0,716	3,058	0,617
3,0	2,035	0,823	2,450	0,725	2,984	0,628
3,2	2,013	0,830	2,413	0,732	2,923	0,638
3,4	1,994	0,835	2,382	0,739	2,870	0,647
3,6	1,978	0,839	2,354	0,745	2,825	0,654
3,8	1,963	0,844	2,330	0,751	2,785	0,661
4,0	1,949	0,848	2,308	0,756	2,749	0,667
4,2	1,937	0,851	2,288	0,760	2,717	0,673
4,4	1,926	0,854	2,270	0,764	2,689	0,678
4,6	1,916	0,857	2,254	0,768	2,662	0,683
4,8	1,906	0,860	2,239	0,772	2,639	0,688
5,0	1,898	0,863	2,225	0,775	2,617	0,692
5,2	1,889	0,865	2,212	0,778	2,596	0,696
5,4	1,882	0,867	2,200	0,781	2,577	0,699
5,6	1,874	0,869	2,188	0,784	2,560	0,703
5,8	1,868	0,872	2,178	0,787	2,543	0,706
6,0	1,861	0,874	2,167	0,789	2,528	0,709
6,2	1,855	0,875	2,159	0,792	2,513	0,712
6,4	1,850	0,877	2,149	0,794	2,500	0,715
6,6	1,844	0,879	2,141	0,796	2,487	0,717
6,8	1,839	0,881	2,132	0,798	2,474	0,720
7,0	1,834	0,882	2,125	0,800	2,463	0,722
7,2	1,829	0,884	2,117	0,802	2,452	0,725
7,4	1,825	0,885	2,110	0,804	2,441	0,727
7,6	1,820	0,886	2,104	0,805	2,431	0,729
7,8	1,816	0,888	2,097	0,807	2,421	0,731
8,0	1,812	0,889	2,091	0,809	2,412	0,733
8,2	1,808	0,890	2,085	0,810	2,403	0,735
8,4	1,804	0,891	2,079	0,812	2,395	0,737
8,6	1,801	0,892	2,074	0,813	2,386	0,738
8,8	1,797	0,894	2,067	0,815	2,379	0,740
9,0	1,794	0,895	2,064	0,816	2,371	0,742
9,2	1,791	0,896	2,059	0,817	2,364	0,743
9,4	1,788	0,897	2,056	0,819	2,357	0,745
9,6	1,785	0,898	2,049	0,820	2,350	0,747
9,8	1,782	0,898	2,045	0,821	2,343	0,748

Продолжение табл. 6.7

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,1$	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$
10	1,779	0,900	2,040	0,822	2,337	0,750
11	1,766	0,904	2,020	0,828	2,307	0,756
12	1,754	0,908	2,003	0,833	2,282	0,762
13	1,744	0,911	1,987	0,837	2,260	0,764
14	1,734	0,914	1,974	0,841	2,240	0,772
15	1,726	0,917	1,961	0,844	2,221	0,776
16	1,718	0,920	1,950	0,848	2,205	0,780
17	1,711	0,922	1,939	0,850	2,191	0,784
18	1,705	0,924	1,930	0,853	2,177	0,787
19	1,699	0,926	1,921	0,856	2,164	0,790
20	1,693	0,928	1,912	0,858	2,153	0,793
21	1,688	0,930	1,905	0,861	2,142	0,796
22	1,683	0,932	1,898	0,863	2,131	0,799
23	1,678	0,933	1,891	0,865	2,122	0,801
24	1,674	0,935	1,884	0,867	2,113	0,804
25	1,669	0,936	1,878	0,869	2,104	0,806
26	1,665	0,938	1,872	0,870	2,096	0,808
27	1,661	0,939	1,867	0,872	2,088	0,810
28	1,658	0,940	1,862	0,874	2,081	0,812
29	1,655	0,942	1,857	0,875	2,074	0,814
30	1,651	0,943	1,852	0,877	2,067	0,815

n = 6

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,1$	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$
1,2	3,608	0,651	6,139	0,421	—	0,167
1,4	2,954	0,759	4,103	0,588	6,657	0,394
1,6	2,709	0,809	3,557	0,658	5,015	0,500
1,8	2,572	0,840	3,282	0,701	4,379	0,559
2,0	2,481	0,862	3,111	0,730	4,026	0,598
2,2	2,415	0,878	2,991	0,752	3,794	0,627
2,4	2,364	0,892	2,902	0,768	3,629	0,649
2,6	2,324	0,903	2,832	0,783	3,503	0,667
2,8	2,290	0,912	2,775	0,795	3,403	0,682
3,0	2,262	0,920	2,727	0,805	3,322	0,695
3,2	2,237	0,927	2,686	0,814	3,253	0,706
3,4	2,219	0,933	2,651	0,822	3,195	0,716

Продолжение табл. 6.7

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,1$	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_0}{A_{-n}}$
3,6			2,197	0,938	2,620	0,829
3,8			2,181	0,943	2,599	0,835
4,0			2,165	0,948	2,569	0,841
4,2			2,151	0,952	2,547	0,846
4,4			2,140	0,956	2,526	0,851
4,6			2,127	0,959	2,508	0,855
4,8			2,117	0,962	2,491	0,859
5,0			2,110	0,966	2,475	0,863
5,2			2,097	0,968	2,461	0,867
5,4			2,089	0,971	2,447	0,870
5,6			2,080	0,974	2,434	0,874
5,8			2,072	0,976	2,422	0,877
6,0			2,065	0,978	2,411	0,880
6,2			2,058	0,981	2,400	0,882
6,4			2,052	0,983	2,390	0,885
6,6			2,046	0,985	2,381	0,887
6,8			2,040	0,987	2,372	0,890
7,0			2,034	0,989	2,363	0,892
7,2			2,029	0,990	2,355	0,894
7,4			2,024	0,992	2,347	0,896
7,6			2,019	0,994	2,339	0,898
7,8			2,014	0,995	2,332	0,900
8,0			2,009	0,997	2,325	0,902
8,2			2,005	0,998	2,318	0,904
8,4			2,001	1,000	2,312	0,906
8,6			1,997	1,001	2,306	0,908
8,8			1,993	1,002	2,300	0,909
9,0			1,989	1,004	2,294	0,911
9,2			1,986	1,005	2,288	0,912
9,4			1,982	1,006	2,283	0,914

Продолжение табл. 6.7

R	Γ _{макс} = 0,02		Γ _{макс} = 0,05		Γ _{макс} = 0,1	
	$\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n}$	$\frac{l_0}{\Lambda_{-n}}$	$\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n}$	$\frac{l_0}{\Lambda_{-n}}$	$\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n}$	$\frac{l_0}{\Lambda_{-n}}$
9,6	1,978	1,007	2,278	0,915	2,615	0,830
9,8	1,975	1,008	2,273	0,917	2,608	0,832
10	1,971	1,010	2,268	0,918	2,601	0,834
11	1,956	1,015	2,245	0,924	2,568	0,841
12	1,943	1,019	2,226	0,930	2,539	0,848
13	1,931	1,023	2,208	0,935	2,514	0,854
14	1,921	1,027	2,193	0,940	2,492	0,860
15	1,911	1,030	2,176	0,944	2,472	0,865
16	1,902	1,034	2,166	0,947	2,454	0,869
17	1,894	1,036	2,154	0,951	2,437	0,873
18	1,881	1,039	2,143	0,955	2,421	0,877
19	1,880	1,042	2,133	0,958	2,407	0,881
20	1,873	1,044	2,123	0,960	2,394	0,884
21	1,867	1,046	2,115	0,963	2,382	0,888
22	1,861	1,048	2,106	0,966	2,370	0,891
23	1,856	1,050	2,099	0,968	2,360	0,893
24	1,851	1,052	2,091	0,970	2,349	0,896
25	1,846	1,054	2,085	0,973	2,340	0,899
26	1,841	1,056	2,078	0,975	2,331	0,901
27	1,837	1,057	2,072	0,977	2,322	0,903
28	1,833	1,059	2,066	0,979	2,314	0,906
29	1,829	1,060	2,060	0,980	2,306	0,908
30	1,825	1,062	2,055	0,982	2,298	0,910

2) Волновые сопротивления ступенек определяются по приближенным формулам:

$$\rho_1 = e^{2\Gamma_1}, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = e^{2\Gamma_2}, \dots, \quad \frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} = e^{2\Gamma_i}, \dots \quad |(6.65)$$

$$\dots \frac{\rho_n}{\rho_{n-1}} = e^{2\Gamma_n}, \quad \frac{R}{\rho_n} = e^{2\Gamma_n+1}.$$

Приближенные расчетные формулы для переходов с максимально плоской частотной характеристикой [5]:

$$\Gamma_i = \frac{1}{2} \ln R \frac{C_i^n}{2^n} C_{i-1}^n, \quad (6.66)$$

где

$$C_0^n = C_n^n = 1; \\ C_{i-1}^n = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-i+2)}{(i-1)!} \quad (6.67)$$

($i = 2, 3, \dots, n$),
а связь между Γ_i и ρ_i дана формулами (6.65). Ступенчатые переходы, рассчитанные с помощью соотношений (6.66) и (6.67), называются биномиальными.

6.5. ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СТУПЕНЧАТЫХ ПЕРЕХОДОВ с $R = 1 \div 30$

Приведенные ранее табл. 6.3 — 6.7 охватывают все расчетные операции, описанные в предыдущих разделах.

В переходах с чебышевской частотной характеристикой каждая таблица (см. табл. 6.3—6.5) имеет два параметра n и $|Γ|_{\text{макс}}$. Крайний левый столбец содержит перепады волновых сопротивлений R , крайние правые столбцы дают соответствующие значения перекрытия диапазона $\frac{\Lambda_{-n}}{\Lambda_n}$ и длины перехода l_0/Λ_{-n} . В остальных столбцах

даны значения волновых сопротивлений ступенек.

Таблицы, служащие для расчета переходов с максимально плоской частотной характеристикой, разбиваются на две группы: первая (см. табл. 6.6) содержит только волновые сопротивления ступенек и один параметр n ; вторая (см. табл. 6.7) дает связь между $|Γ|_{\text{макс}}$, l_0/Λ_{-n} и Λ_{-n}/Λ_n . Причина такого разделения заключается в том, что задание перепада R и n для переходов с максимально плоской характеристикой, с одной стороны, определяет однозначную связь между $|Γ|_{\text{макс}}$ и Λ_{-n}/Λ_n , с другой — независимость $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ перехода от $|Γ|_{\text{макс}}$.

Численные значения величин, представленные в таблицах, определялись на ЭВМ различными способами. При $n = 2 \div 6$ использовались формулы (6.14) — (6.24), (6.32) — (6.39), а также методика синтеза ступенчатых переходов, описанная в работах [4, 5]. При $n = 7 \div 20$ расчеты велись по приближенным формулам и методике, изложенной в § 6.4.

Проверка численных значений волновых сопротивлений ступенек осуществлялась по оценке величины входного сопротивления ступенчатого перехода при $\theta = \frac{\pi}{2}$.

Для четного n

$$R_{\text{вх}} = \frac{\rho_1^2 \rho_3^2 \dots \rho_{n-1}^2 R}{\rho_2^2 \rho_4^2 \dots \rho_n^2} \quad (6.68)$$

$$|\Gamma|_{\text{bx}} = \frac{1 - R_{\text{bx}}}{1 + R_{\text{bx}}} = |\Gamma|_{\text{макс}}, \quad (6.69)$$

и для нечетного n

$$R_{\text{bx}} = \frac{p_1^2 p_3^2 \dots p_n^2}{p_2^2 p_4^2 \dots p_{n-1}^2 R}. \quad (6.70)$$

$$|\Gamma|_{\text{bx}} = \frac{1 - R_{\text{bx}}}{1 + R_{\text{bx}}} = 0. \quad (6.71)$$

В табл. 6.1 и 6.2 представлены значения числа ступенек переходов двух типов, необходимые для согласования линий передач с перепадом волнового сопротивления R в полосе пропускания $W_{\text{п}}$ при допуске на рассогласование $|\Gamma|_{\text{макс}}$. Расчеты n_1 для чебышевского перехода велись по формулам (6.13), (6.25) и (6.28). Величины n_2 для переходов с максимально плоской частотной характеристикой определялись с помощью (6.40).

6.6. ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СТУПЕНЧАТЫХ ПЕРЕХОДОВ С ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ ПЕРЕПАДОМ ВЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

($R = 10 \div 10^{10}$)

Согласующие переходы с очень большим перепадом волнового сопротивления рассчитаны в работе [8] по точным формулам Коллена [3] для числа ступенек $n = 2, 3$ и 4 . Ранее они приведены под номерами (6.17) — (6.23) (чебышевские переходы) и (6.35) — (6.39) (переходы с максимально плоской частотной характеристикой). Применялась граоаналитическая обработка таблиц, помещенных в [8]. Структура табл. 6.8 — 6.10 такая же, как в предыдущем разделе.

Таблица 6.8

Расчетные параметры чебышевских переходов (большие R)

$n = 2$

R	$ \Gamma _{\text{макс}} = 0,02$			
	p_1	p_2	$\frac{\Delta_{\text{--п}}}{\Delta_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{\text{--п}}}$
10	1,80	5,57	1,238	0,447
10^2	3,19	31,31	1,121	0,471
10^3	5,68	176,06	1,066	0,484

$n = 2$

R	$ \Gamma _{\text{макс}} = 0,05$			
	p_1	p_2	$\frac{\Delta_{\text{--п}}}{\Delta_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{\text{--п}}}$
10	1,82	5,48	1,404	0,416
10^2	3,24	30,84	1,199	0,455
10^3	5,76	173,43	1,107	0,475

$n = 2$

R	$ \Gamma _{\text{макс}} = 0,10$			
	p_1	p_2	$\frac{\Delta_{\text{--п}}}{\Delta_{\text{п}}}$	$\frac{I_0}{\Delta_{\text{--п}}}$
10	1,87	5,35	1,620	0,382
10^2	3,32	30,07	1,293	0,436
10^3	5,91	169,12	1,154	0,464

$n = 3$

R	$ \Gamma _{\text{макс}} = 0,02$			
	p_1	p_2	p_3	$\frac{\Delta_{\text{--п}}}{\Delta_{\text{п}}}$
10	1,39	3,16	7,19	1,635
10^2	1,92	10,0	52,08	1,381
10^3	2,74	31,62	364,96	1,245
10^4	3,98	100,0	2512,0	1,161
10^5	5,75	316,2	17390,0	1,070

$n = 3$

R	$ \Gamma _{\text{макс}} = 0,05$			
	p_1	p_2	p_3	$\frac{\Delta_{\text{--п}}}{\Delta_{\text{п}}}$
10	1,43	3,70	6,97	1,958
10^2	1,99	10,00	50,25	1,552
10^3	2,86	31,62	349,65	1,347
10^4	4,09	100,00	2415,00	1,224
10^5	5,89	316,20	16980,00	1,148

Продолжение табл. 6.8
 $n = 3$

R	$ \Gamma _{\max} = 0,10$				
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$
10	1,51	3,16	6,63	2,354	0,447
10^2	2,11	10,00	47,39	1,745	0,546
10^3	3,00	31,62	333,33	1,457	0,610
10^4	4,33	100,00	2309,00	1,291	0,655
10^5	6,18	316,20	16180,00	1,190	0,685
10^6	9,46	1000,0	$100,7 \cdot 10^3$	1,126	0,706

$n = 4$

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$				
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A_{-n}}{A_n}$
10	1,23	2,16	4,60	8,10	2,119
10^2	1,50	4,71	21,23	66,67	1,725
10^3	1,87	10,43	95,88	533,90	1,501
10^4	2,39	23,65	422,80	4184	1,355
10^5	3,04	55,50	1802	32840	1,255
10^6	4,09	129	7752	$24,45 \cdot 10^4$	1,186
10^7	5,35	278	35970	$186,9 \cdot 10^4$	1,136

$n = 4$

R	$ \Gamma _{\max} = 0,05$				
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A_{-n}}{A_n}$
10	1,28	2,23	4,60	7,79	2,602
10^2	1,58	4,87	20,53	63,09	1,993
10^3	2,01	10,85	92,00	498,00	1,669
10^4	2,54	24,70	404,90	3937,00	1,466
10^5	3,20	58,90	169,80	31250,00	1,332
10^6	4,36	134,00	7463,00	$22,93 \cdot 10^4$	1,239
10^7	5,55	290,00	34480,00	$180,2 \cdot 10^4$	1,174
10^8	7,30	735,00	$136 \cdot 10^3$	$1370 \cdot 10^4$	1,128

360

Продолжение табл. 6.8
 $n = 4$

R	$ \Gamma _{\max} = 0,10$				
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	$\frac{A_{-n}}{A_n}$
10	1,37	2,31	4,34	7,30	3,173
10^2	1,70	5,14	19,45	58,86	2,286
10^3	2,15	11,47	87,18	465,30	1,844
10^4	2,77	26,25	381,00	3604,00	1,579
10^5	3,52	61,85	1617,00	28410,00	1,407
10^6	4,79	141,00	7092,00	$20,88 \cdot 10^4$	1,291
10^7	6,00	320,00	$3,125 \cdot 10^4$	$166,7 \cdot 10^4$	1,211
10^8	7,60	774,00	$12,92 \cdot 10^4$	$13,16 \cdot 10^4$	1,154
10^9	10,00	1740,00	$57,47 \cdot 10^4$	10^8	1,113

Таблица 6.9

Перекрытие диапазона и длина перехода с максимально плоской частотной характеристикой (большие R)

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,10$	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$
10	1,164	0,462	1,273	0,440	1,413	0,414
10^2	1,084	0,482	1,137	0,468	1,200	0,454
10^3	1,046	0,489	1,074	0,482	1,107	0,475

R	$ \Gamma _{\max} = 0,02$		$ \Gamma _{\max} = 0,05$		$ \Gamma _{\max} = 0,10$	
	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$	$\frac{A_{-n}}{A_n}$	$\frac{I_o}{A_{-n}}$
10	1,367	0,634	1,540	0,591	1,744	0,547
10^2	1,227	0,674	1,322	0,646	1,427	0,618
10^3	1,148	0,698	1,207	0,680	1,269	0,661
10^4	1,098	0,715	1,136	0,702	1,175	0,690
10^5	1,066	0,726	1,091	0,717	1,116	0,709
10^6	1,044	0,734	1,061	0,728	1,077	0,722
10^7	1,028	0,739	1,040	0,735	1,052	0,731

361

Продолжение табл. 6.9

 $n = 4$

R	$ Γ _{\max} = 0,02$		$ Γ _{\max} = 0,05$		$ Γ _{\max} = 0,10$	
	$\frac{A_{\perp}}{A_{\parallel}}$	$\frac{l_s}{A_{\perp}}$	$\frac{A_{\perp}}{A_{\parallel}}$	$\frac{l_s}{A_{\perp}}$	$\frac{A_{\perp}}{A_{\parallel}}$	$\frac{l_s}{A_{\perp}}$
10	1,577	0,776	1,798	0,715	2,052	0,656
10^2	1,387	0,838	1,517	0,795	1,654	0,754
10^3	1,275	0,879	1,360	0,847	1,446	0,818
10^4	1,199	0,910	1,257	0,886	1,314	0,864
10^5	1,145	0,932	1,186	0,915	1,226	0,899
10^6	1,106	0,949	1,136	0,936	1,164	0,924
10^7	1,076	0,962	1,099	0,952	1,120	0,963
10^8	1,000	0,971	1,000	0,964	1,085	0,987

6.7. КОРРЕКЦИЯ ДЛИНЫ СТУПЕНЕК В СВЯЗИ С УЧЕТОМ ПАРАЗИТНОЙ ЕМКОСТИ СКАЧКОВ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В тех случаях, когда скачкообразное изменение волнового сопротивления передающей линии достигается за счет вариаций ее геометрических размеров (например, изменения либо высоты прямоугольного волновода, либо диаметра внутреннего проводника коаксиала), возникают паразитные емкости за счет местных возмущений поля на стыках ступенек.

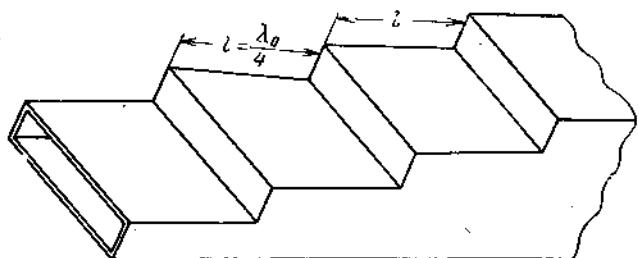


Рис. 6.8. Ступенчатый переход между двумя прямоугольными волноводами одинаковой ширины и разной высоты

Полный расчет ступенчатого перехода рекомендуется проводить в два этапа. Предварительный расчет проводится без учета емкостей по изложенной выше методике. Уточнение расчета заключается в коррекции (уменьшение) длины ступенек.

Таблица 6.10

Волновые сопротивления переходов с максимальной плоской частотной характеристикой (большие R)

R	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2
10	1,778	5,623	1,289	3,162	7,755	1,161
10^2	3,162	31,623	1,766	10,000	56,610	1,386
10^3	5,623	177,826	2,528	31,623	395,507	1,712
10^4	—	—	3,686	100,000	2713,000	2,182
10^5	—	—	5,403	316,228	18507,000	2,821
10^6	—	—	7,932	1000,000	$1261 \cdot 10^3$	3,700
10^7	—	—	—	—	—	4,887
10^8	—	—	—	—	—	6,481
10^9	—	—	—	—	—	8,616
10^{10}	—	—	—	—	—	11,470

Уменьшение длины l' ступеньки, выполненной в прямоугольном волноводе (рис. 6.8), подсчитывается по формуле [11]

$$l' = \frac{B}{2} \frac{\Lambda_0}{2\pi}, \quad (6.72)$$

где нормированная емкостная проводимость $B = b\rho_i$ определялась по графикам рис. 4.56.

Максимальное влияние возмущенных зон имеет место при $\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = 2$ (рис. 6.9).

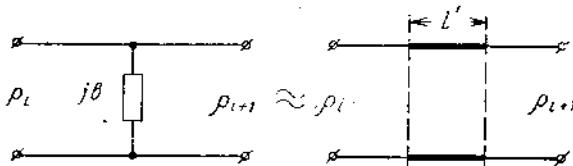


Рис. 6.9. К замене емкости скачка эквивалентным отрезком линии

Аналогичная коррекция осуществляется для случая ступеньки, выполненной на внутреннем проводнике коаксиальной линии. Здесь

$$l' = \frac{B\lambda_0}{4\pi}, \quad (6.73)$$

где B определяется по графикам рис. 4.56.

6.8. ПРИМЕРЫ

1. Даны два прямоугольных волновода сечением $(72 \times 34) \text{ мм}$ и $(72 \times 10) \text{ мм}$. Рассчитать чебышевский ступенчатый переход между ними, обеспечивающий в полосе, ограниченной длипами волн 11 и $13,44 \text{ см}$, допуск на рассогласование

$$|\Gamma|_{\max} \leq 0,05 \quad (\text{КВ} \geq 0,9).$$

1) Переход волнового сопротивления

$$R = \frac{34}{10} = 3,4.$$

2) Длины волн в волноводах, соответствующие граничным длинам волн полосы пропускания,

$$\Lambda_n = \frac{\lambda_n}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_n}{2a}\right)^2}} = \frac{11}{\sqrt{1 - \left(\frac{11}{2 \cdot 7,2}\right)^2}} = 17 \text{ см},$$

$$\Lambda_{n-1} = \frac{\lambda_{n-1}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{n-1}}{2a}\right)^2}} = \frac{13,44}{\sqrt{1 - \left(\frac{13,44}{2 \cdot 7,2}\right)^2}} = 37,6 \text{ см},$$

и требуемая величина перекрытия диапазона составляет

$$\frac{\Lambda_{n-1}}{\Lambda_n} \geq \frac{37,6}{17} = 2,2.$$

3) По табл. 6.5 находим, что для получения $\frac{\Lambda_{n-1}}{\Lambda_n} > 2,2$ при

$R = 3,4$ и $|\Gamma|_{\max} = 0,05$ необходимо взять $n = 3$, и при этом приведенные волновые сопротивления ступенек

$$\rho_1 = 1,239, \quad \rho_2 = 1,845, \quad \rho_3 = 2,745.$$

Высоты ступенек соответственно равны:

$$\begin{aligned} b_1 &= b_0 \rho_1 = 10 \cdot 1,239 = 12,39 \text{ мм}, \\ b_2 &= b_0 \rho_2 = 10 \cdot 1,845 = 18,45 \text{ мм}, \\ b_3 &= b_0 \rho_3 = 10 \cdot 2,745 = 27,45 \text{ мм}. \end{aligned}$$

4) Длина перехода (см. табл. 6.5)

$$\frac{l_0}{\Lambda_{n-1}} = 0,439, \quad l_0 = 0,439 \cdot \Lambda_{n-1} = 0,439 \cdot 37,6 = 16,5 \text{ см}.$$

Длина ступенек

$$l = \frac{l_0}{n} = \frac{16,5}{3} = 5,5 \text{ см}.$$

5) Корректируем длину ступенек. В соответствии с § 6.7 находим вспомогательные расчетные параметры для первой ступеньки:

$$\frac{2 \cdot b_1}{\Lambda_0} = \frac{2 \cdot 12,39}{220} = 0,113, \quad \Lambda_0 = 4l = 220 \text{ мм},$$

$$\frac{b_0}{b_1} = \frac{10}{12,39} = 0,805;$$

по графику рис. 4.56 находим

$$B \frac{\Lambda_0}{2b_1} = 0,15,$$

$$B = 0,15 \frac{2b_1}{\Lambda_0} = \frac{0,15 \cdot 2 \cdot 12,39}{220} = 0,017,$$

$$l' = \frac{B}{2} \frac{\Lambda_0}{2\pi} = \frac{0,017}{2} \cdot \frac{220}{2\pi} = 0,3 \text{ мм};$$

скорректированная длина первой ступеньки

$$l_1 = l - l' = 55 - 0,3 = 54,7 \text{ мм}$$

Подобным же образом можно скорректировать длину второй l_2 и третьей l_3 ступенек: $l_2 = 53,97 \text{ мм}$, $l_3 = 53,47 \text{ мм}$.

Эскиз перехода дан на рис. 6.10, см. также рис. 6.8.

II. Даны две коаксиальные линии с одинаковым диаметром внешнего проводника $D = 30 \text{ мм}$ и разными диаметрами внутреннего проводника $d_0 = 17,38 \text{ мм}$ и $d = 9 \text{ мм}$ (рис. 6.11). Рассчитать чебышевский ступенчатый переход, обеспечивающий в полосе пропускания, ограниченной длинами волн 9 и 12,4 см, допуск на согласование $|\Gamma|_{\max} \leq 0,02$.

1) Перепад волнового сопротивления

$$\tilde{\rho}_0 = 138 \lg \frac{D}{d_0} = 138 \lg \frac{30}{17,38} = 32,85 \text{ ом},$$

$$r = 138 \lg \frac{D}{d} = 138 \lg \frac{30}{9} = 72,25 \text{ ом}.$$

$$R = \frac{r}{\tilde{\rho}_0} = \frac{72,25}{32,85} = 2,2.$$

2) Перекрытие диапазона

$$\frac{\lambda_{\text{--п}}}{\lambda_{\text{n}}} = \frac{12,4}{9} = 1,38.$$

3) По табл. 6.4 находим, что для получения $\frac{\lambda_{\text{--п}}}{\lambda_{\text{n}}} > 1,38$ при $R=2,2$, $|\Gamma|_{\max} = 0,02$ необходимо $n = 2$, и при этом волновые сопротивления ступенек равны

$$\rho_1 = 1,230, \quad \rho_2 = 1,789,$$

соответственно

$$\tilde{\rho}_1 = \tilde{\rho}_0 \cdot 1,23 = 40,1 \text{ ом}, \quad \tilde{\rho}_2 = \tilde{\rho}_0 \cdot 1,79 = 58,2 \text{ ом}.$$

Диаметры внутреннего проводника ступенек $d_1 = 15,35 \text{ мм}$, $d_2 = 11,35 \text{ мм}$.

4) Длина перехода из табл. 6.4

$$\frac{l_0}{\lambda_{\text{--п}}} = 0,401, \quad l_0 = \lambda_{\text{--п}} \cdot 0,401 = 12,4 \cdot 0,401 = 4,98 \text{ см}.$$

Длина ступеньки

$$l = \frac{l_0}{n} = \frac{4,98}{2} = 2,49 \text{ см}.$$

5) Частотная характеристика перехода рассчитывается согласно соотношению

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{L-1}{L}},$$

где

$$L = 1 + h^2 T_2^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right) = 1 + 0,02^2 \left\{ 2 \left(\frac{\cos \theta}{0,307} \right)^2 - 1 \right\}^2;$$

при этом

$$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 2,49}{\lambda}.$$

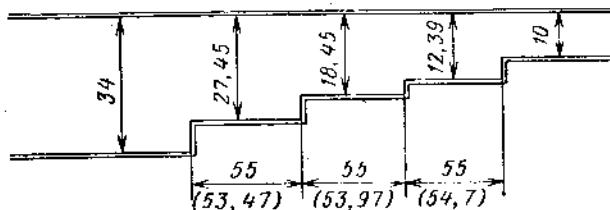


Рис. 6.10. Эскиз рассчитанного ступенчатого перехода.
В скобках даны скорректированные длины ступенек.

Эскиз ступенчатого перехода совместно с подводящими линиями дан на рис. 6.11. Расчетная и экспериментальная частотные характеристики приводятся на рис. 6.12.

III. Даны два прямоугольных волновода сечением $(72 \times 34) \text{ мм}$ и $(72 \times 10) \text{ мм}$. Рассчитать ступенчатый переход с максимально плоской частотной характеристикой, обеспечивающей в полосе, ограниченной длинами волн 11,8—8,8 см, допуск на согласование $|\Gamma|_{\max} = 0,05$.

1) Перепад волнового сопротивления

$$R = \frac{34}{10} = 3,4.$$

2) Длины волн в волноводе

$$\Lambda_n = \frac{\lambda_{\text{--п}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{--п}}}{2a} \right)^2}} = \frac{8,8}{\sqrt{1 - \left(\frac{8,8}{14,4} \right)^2}} = 11,11 \text{ см},$$

$$\Lambda_{\text{--п}} = \frac{\lambda_{\text{--п}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{--п}}}{2a} \right)^2}} = \frac{11,8}{\sqrt{1 - \left(\frac{11,8}{14,4} \right)^2}} = 20,56 \text{ см},$$

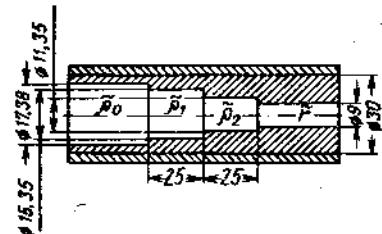


Рис. 6.11. Ступенчатый переход внутри коаксиальной линии.

Величина перекрытия диапазона составляет

$$\frac{\Lambda_{\text{н}} - \pi}{\Lambda_{\text{n}}} = \frac{20,56}{11,11} = 1,86.$$

3) По табл. 6.7 находим, что для получения $\Delta_{\text{н}}/\Lambda_{\text{n}} \geq 1,86$ при $R = 3,4$ и $|\Gamma|_{\text{макс}} = 0,05$ необходимо, чтобы $n = 4$; приведенные волновые сопротивления соответственно равны (см. табл. 6.6):

$$\rho_1 = 1,080, \quad \rho_2 = 1,467, \quad \rho_3 = 2,317, \quad \rho_4 = 3,147.$$

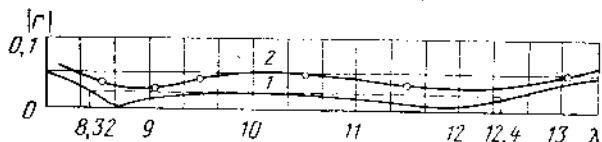


Рис. 6.12. Расчетная и экспериментальная частотные характеристики:
1 — расчетная характеристика; 2 — экспериментальная характеристика.

Высоты ступенек:

$$\begin{aligned} b_1 &= b_0 \rho_1 = 10 \cdot 1,08 = 10,80 \text{ мм}, \\ b_2 &= b_0 \rho_2 = 10 \cdot 1,467 = 14,67 \text{ мм}, \\ b_3 &= b_0 \rho_3 = 10 \cdot 2,317 = 23,17 \text{ мм}, \\ b_4 &= b_0 \rho_4 = 10 \cdot 3,147 = 31,47 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Длина перехода (см. табл. 6.7)

$$\frac{l_0}{\Lambda_{\text{н}}} = 0,647, \quad l_0 = 0,647 \cdot \Lambda_{\text{н}} = 0,647 \cdot 20,56 = 13,3 \text{ см}.$$

Длина ступеньки

$$l = \frac{l_0}{n} = \frac{13,3}{4} = 3,33 \text{ см.}$$

6.9. СТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕХОД МЕЖДУ ДВУМЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВОЛНОВОДАМИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ

Методика расчета, изложенная ниже, строится на базе теории чебышевских и максимально плоских ступенчатых переходов и понятия волнового сопротивления (см. § 4.6). При проектировании ступенчатых переходов между двумя прямоугольными волноводами с различными широкими и узкими стенками следует помнить, что перепад размеров широких стенок, как правило, невелик; он лежит обычно в пределах размеров стандартных волноводов одного и того же

диапазона (например, 90 и 72 мм в диапазоне 10 см). Это обстоятельство позволяет применить некоторые изложенные ниже приближенные методы.

К «специальным» типам ступенчатых переходов относятся переходы между прямоугольными волноводами различных сечений, ступенчатые переходы с коаксиальной линией на волновод, а также ступенчатые переходы в линиях передачи СВЧ энергии, частично заполненных диэлектриком. Приведенные ниже примеры должны помочь в проектировании не только ступенчатых переходов, описанных в данном разделе, но и многих других, близких к ним.

Пусть заданы два прямоугольных волновода (рис. 6.13) с сечениями $a_0 \times b_0$ и $a_r \times b_r$. Волновое сопротивление волновода с сечением $a_0 \times b_0$ обозначим через ρ_0 , а с сечением $a_r \times b_r$ через ρ_r .

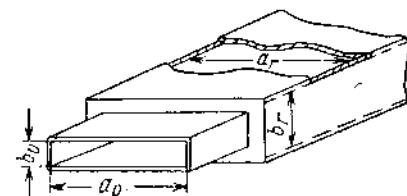


Рис. 6.13. Соединение двух прямоугольных волноводов с разными сечениями.

Для двух не заполненных диэлектриком прямоугольных волноводов, возбужденных на волне H_{10} , перепад волновых сопротивлений R записывается в соответствии с формулой (4.40) на средней волне диапазона в виде

$$R = \frac{\rho_r}{\rho_0} = \frac{b_r \Lambda_r}{b_0 \Lambda_0}, \quad (6.74)$$

где

$$\Lambda_r = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{2a_r}\right)^2}}; \quad (6.75)$$

$$\Lambda_0 = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{2a_0}\right)^2}}. \quad (6.76)$$

Заметим, что перепад волновых сопротивлений R является в общем случае частотно зависимым, однако при небольших перепадах волновых сопротивлений с достаточной для практики точностью можно проводить расчет на средней волне заданного рабочего диапазона $\lambda_{\text{ср}}$:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{макс}} + \lambda_{\text{мин}}}{2}, \quad (6.77)$$

где $\lambda_{\text{макс}}$ и $\lambda_{\text{мин}}$ — граничные волны заданного рабочего диапазона.

Требуемый диапазон перекрытия Λ_{-n}/Λ_n выбираем с запасом, а именно:

$$\Lambda_{-n} = \frac{\lambda_{\max}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\max}}{2a_0}\right)^2}}, \quad (6.75)$$

$$\Lambda_n = \frac{\lambda_{\min}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{2a_r}\right)^2}}, \quad (6.76)$$

где a_0 и a_r — размеры входного и выходного волноводов (рис. 6.13).

$$a_0 < a_r.$$

Задаваясь требуемым коэффициентом отражения $|\Gamma|_{\max}$ и типом перехода, по рассчитанным Λ_{-n}/Λ_n и R можно найти (с помощью таблиц 6.3—6.7) число ступенек перехода n , нормированные сопротивления ступенек ρ_i и общую длину перехода l_0/Λ_{-n} .

В рассматриваемом нами случае расчета ступенчатых переходов между двумя прямоугольными волноводами с произвольным сечением требуется величина перепада волновых сопротивлений в i -й ступеньке может быть реализована подбором двух величин (a_i либо b_i). Отсюда следует, что, выбрав закон изменения одной из этих величин, можно найти соответствующую величину другой. Ниже для простоты будет применяться линейный закон изменения для одной из указанных величин (a_i или b_i).

Например, задаваясь линейным законом изменения a_i , находим для каждой ступеньки

$$\Lambda_{i \text{ cp}} = \frac{\lambda_{\text{cp}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{cp}}}{2a_i}\right)^2}}, \quad (6.77)$$

откуда нескорректированная длина ступеньки

$$l_i = \frac{\Lambda_{i \text{ cp}}}{4}. \quad (6.78)$$

Высоту ступенек b_i находим из соотношения $\frac{b_i}{b_0} = \frac{b_i \Delta_i}{b_0 \Delta_0}$:

$$b_i = \frac{\rho_i b_0 \Delta_0}{\Lambda_{i \text{ cp}}}, \quad (6.79)$$

где

$$\rho_i = \frac{\tilde{\rho}_i}{\tilde{\rho}_0}, \quad (6.80)$$

В случае же, если выбран линейный закон изменения b_i производится в следующем порядке:

по известному ρ_i находим

$$\Lambda_{i \text{ cp}} = \frac{\rho_i b_0 \Delta_0}{b_i} \quad (6.84)$$

и соответственно — не скорректированную длину ступеньки по формуле (6.81).

Размер a_i определяется по формуле

$$a_i = \frac{\lambda_{\text{cp}}}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{cp}}}{\Lambda_{i \text{ cp}}}\right)^2}}. \quad (6.85)$$

Методика расчета ступенчатых переходов, описанная выше, не учитывает влияния реактивностей, обусловленных дифракционными явлениями на стыках ступенек. Учет этих реактивностей (B) сводится к коррекции длины ступенек, проведенной после основного расчета, и приводит, как показано в § 6.7, к введению эквивалентного отрезка линии

$$l'_i = \pm \frac{B_i}{\pi} \cdot \frac{\Lambda_{i \text{ cp}}}{4}, \quad (6.86)$$

где B_i — реактивность скачка i -й ступеньки;

$+ l'_i$ — для Н-переходов;

$- l'_i$ — для Е-переходов.

С достаточной для практики точностью можно считать, что коррекция длины ступеньки Δ составляет 2—3% длины ступеньки l_i , т. е. скорректированная длина ступеньки

$$l_i^0 = l_i \pm \Delta, \quad (6.87)$$

где

$$\Delta = (2 \div 3) \% l_i. \quad (6.88)$$

$+ \Delta$ — для Н-переходов;

$- \Delta$ — для Е-переходов.

Описанная приближенная методика расчета ступенчатых переходов между двумя прямоугольными волноводами произвольного сечения иллюстрируется следующим примером.

П р и м е р. Рассчитать ступенчатый переход между двумя прямоугольными волноводами (рис. 6.13) с сечениями $a_0 \times b_0 = 72 \times 10$ мм и $a_r \times b_r = 90 \times 45$ мм. Переход должен работать в диапазоне волн от 9,1 до 10,9 см с КВВ не меньше 92%.

П о р я д о к р а с ч е т а .

1. Средняя волна рабочего диапазона [формула (6.77)]

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{91 \div 109}{2} = 100 \text{ мм.}$$

2. Длины волн в выходных волноводах на средней волне λ_{cp} определяются по формулам (6.75) и (6.76):

$$\Lambda_{0 \text{ cp}} = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{cp}}}{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{cp}}}{2a_0}\right)^2}} = \sqrt{\frac{100}{1 - \left(\frac{100}{2 \cdot 72}\right)^2}} = 138,9 \text{ мм},$$

$$\Lambda_{r \text{ cp}} = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{cp}}}{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{cp}}}{2a_r}\right)^2}} = \sqrt{\frac{100}{1 - \left(\frac{100}{2 \cdot 90}\right)^2}} = 120,2 \text{ мм}.$$

3. Переход волновых сопротивлений R в соответствии с формулой (6.74):

$$b_r \Lambda_r = 45 \cdot 120,2 = 5409,$$

$$b_0 \Lambda_0 = 10 \cdot 138,9 = 1389,$$

$$R = \frac{5409}{1389} = 3,89.$$

4. Диапазон перекрытия $\frac{\Lambda_{-\pi}}{\Lambda_\pi}$ по формулам (6.78) и (6.79) находим с запасом:

$$\Lambda_{-\pi} = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{1 - \left(\frac{\lambda_{\max}}{2a_0}\right)^2}} = \sqrt{\frac{120}{1 - \left(\frac{120}{2 \cdot 72}\right)^2}} = 218 \text{ мм};$$

$$\Lambda_\pi = \sqrt{\frac{\lambda_{\min}}{1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{2a_r}\right)^2}} = \sqrt{\frac{80}{1 - \left(\frac{80}{2 \cdot 90}\right)^2}} = 89,5 \text{ мм},$$

$$\frac{\Lambda_{-\pi}}{\Lambda_\pi} = 2,44.$$

5. Выбираем переход с чебышевской частотной характеристикой.

6. Число ступеней перехода n выбираем по табл. 6.4, задаваясь $|\Gamma|_{\max} = 0,02$, что соответствует КБВ = 0,96 (требуемая величина 0,92), и исходя из рассчитанных $\frac{\Lambda_{-\pi}}{\Lambda_\pi} = 2,44$ и, $R = 3,89$.

Из табл. 6.4 для $R = 3,8$ и $\frac{\Lambda_{-\pi}}{\Lambda_\pi} = 2,456$ находим $n = 4$.

7. Нормированные волновые сопротивления ступенек для $R = 3,8$ и $|\Gamma|_{\max} = 0,02$ находим по табл. 6.4:

$$\rho_1 = 1,142, \rho_2 = 1,578, \rho_3 = 2,409, \rho_4 = 3,329.$$

8. Задаваясь линейным законом распределения a_i каждой ступеньки, найдем $\Lambda_{i \text{ cp}}$:

$$a_i = a_0 + i \Delta a_i, \quad (6.89)$$

где

$$\Delta a_i = \frac{a_r - a_0}{n+1}; \quad (6.90)$$

$$\Delta a_i = \frac{90 - 72}{4+1} = 3,6 \text{ мм};$$

$$a_1 = 72 + 1 \cdot 3,6 = 75,6 \text{ мм};$$

$$a_2 = 72 + 2 \cdot 3,6 = 79,2 \text{ мм},$$

$$a_3 = 72 + 3 \cdot 3,6 = 82,8 \text{ мм},$$

$$a_4 = 72 + 4 \cdot 3,6 = 86,4 \text{ мм}.$$

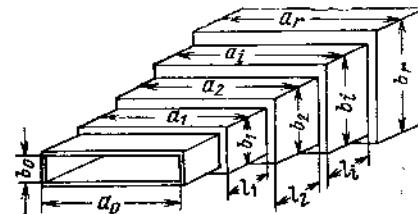


Рис. 6.14. Ступенчатый переход.

По формуле (6.80) находим:

$$\Lambda_{1 \text{ cp}} = 133,3 \text{ мм}, \Lambda_{2 \text{ cp}} = 128,9 \text{ мм}, \Lambda_{3 \text{ cp}} = 125,5 \text{ мм}, \Lambda_{4 \text{ cp}} = 122,5 \text{ мм}.$$

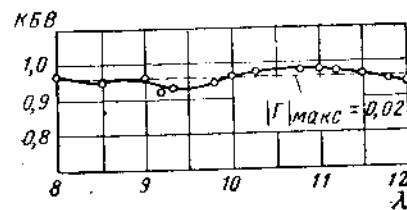


Рис. 6.15 График КБВ = $f(\lambda)$ четырехступенчатого чебышевского перехода.

9. Длины ступенек перехода без учета коррекции определяются по формуле (6.81):

$$l_1 = 33,3 \text{ мм}, l_2 = 32,2 \text{ мм}, l_3 = 31,3 \text{ мм}, l_4 = 30,6 \text{ мм}.$$

С учетом коррекции длины ступенек вычисляются по формулам (6.87) и (6.88).

10. Высоты ступенек (рис. 6.14) определяются в соответствии с формулой (6.82):

$$b_i = \frac{\rho_i b_0 \Lambda_0}{\Lambda_{i \text{ cp}}},$$

где

$$b_0 \Lambda_0 = 10 \cdot 138,9 = 1389;$$

$$\rho_1 = 1,142; \quad \rho_2 = 1,578; \quad \rho_3 = 2,409; \quad \rho_4 = 3,329 \text{ (см. пункт 7);}$$

$$b_1 = \frac{1586}{133,3} = 11,9 \text{ мм}; \quad b_2 = \frac{2192}{128,9} = 17 \text{ мм};$$

$$b_3 = \frac{3346}{125,5} = 26,6 \text{ мм}; \quad b_4 = \frac{4624}{122,5} = 37,7 \text{ мм.}$$

11. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов дано на рис. 6.15.

6.10. РАСЧЕТ СТУПЕНЧАТЫХ ПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ ДВУМЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВОЛНОВОДАМИ ОДИНАКОВОЙ ВЫСОТЫ РАЗНОЙ ШИРИНЫ (Н-ПЛОСКОСТЬ)

Схематическое изображение перехода дано на рис. 6.16. Рассматриваемый случай расчета является частным по отношению к описанному в § 6.9. По условиям задачи $b_0 = b_r = b = \text{const}$. Методика

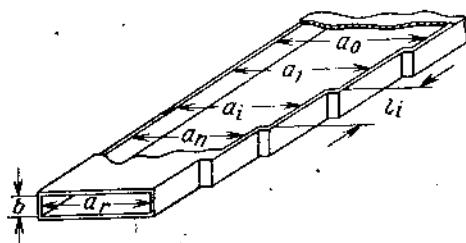


Рис. 6.16. Ступенчатый переход в Н-плоскости.

расчета переходов в Н-плоскости (при небольшом перепаде) строится следующим образом:

1. Расчет ведем на средней волне $\lambda_{\text{ср}}$ заданного рабочего диапазона волн $\lambda_1 - \lambda_2$:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2},$$

где λ_1 — короткая, а λ_2 — длинная волна заданного диапазона.

2. Перепад волновых сопротивлений R заданных волноводов $a_0 \times b_0$ и $a_r \times b_r$, где $a_r < a_0$, вычисляется в соответствии с формулой (4.40):

$$R = \frac{\Lambda_r}{\Lambda_0}, \quad (6.9)$$

где Λ_r — длина волны в узком, а Λ_0 — в широком волноводе; и Λ_r рассчитываются по формуле (6.80).

3. Перекрытие диапазона $\Lambda_{-\pi}/\Lambda_\pi$ в соответствии с формулами (6.78) и (6.79) (с запасом) равно

$$\Lambda_{-\pi} = \frac{\lambda_{\text{макс}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{макс}}}{2a_0}\right)^2}}; \quad (6.92)$$

$$\Lambda_\pi = \frac{\lambda_{\text{мин}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{мин}}}{2a_r}\right)^2}}. \quad (6.93)$$

4. Выбрав тип перехода (чебышевский или максимально плоский) и задавшись необходимым $|\Gamma|_{\text{макс}}$ в соответствии с определенными выше R и $\frac{\Lambda_{-\pi}}{\Lambda_\pi}$, по таблицам 6.3—6.7 находим число ступенек n и волновые сопротивления (нормированные) отдельных ступенек ρ_i .

5. Ширину каждой ступеньки a_i и ее длину l_i можно определить, исходя из следующих соотношений:

а) из (6.84) находим

$$\Lambda_i = \Lambda_0 \rho_i; \quad (6.94)$$

б) по формуле (6.85) находим a_i :

$$a_i = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{\Lambda_i}\right)^2}}; \quad (6.95)$$

в) длина ступенек l_i без учета коррекции определяется как

$$l_i = \frac{\Lambda_i}{4}$$

или с учетом коррекции — по формулам (6.87) и (6.88).

Методика расчета иллюстрируется следующим примером.

Пример. Рассчитать переход между двумя волноводами с сечениями $a_0 \times b_0 = 90 \times 45$ и $a_r \times b_r = 70 \times 45$ мм в диапазоне волн от $\lambda_1 = 9,1$ см до $\lambda_2 = 11,9$ см.

Порядок расчета. 1. Средняя волна рабочего диапазона

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{91 + 119}{2} = 105 \text{ мм.}$$

2. Длины волн в выходных волноводах на средней волне $\lambda_{\text{ср}}$ по формулам (6.75) и (6.76):

$$\Lambda_{0 \text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{2a_0}\right)^2}} = \frac{105}{\sqrt{1 - \left(\frac{105}{2 \cdot 90}\right)^2}} = 129 \text{ мм.}$$

$$\Delta_{r, \text{cp}} = \frac{\lambda_{\text{cp}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{cp}}}{2a_r}\right)^2}} = \frac{105}{\sqrt{1 - \left(\frac{105}{2 \cdot 70}\right)^2}} = 158 \text{ мм.}$$

3. Перепад волновых сопротивлений R в соответствии с формулой (6.74)

$$R = \frac{158}{129} = 1,22.$$

4. Диапазон перекрытия находим с запасом:

$$\Delta_{-n} = \frac{\lambda_{\text{макс}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{макс}}}{2a_0}\right)^2}} = \frac{120}{\sqrt{1 - \left(\frac{120}{2 \cdot 70}\right)^2}} = 235 \text{ мм.}$$

$$\Delta_n = \frac{\lambda_{\text{мин}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{мин}}}{2a_r}\right)^2}} = \frac{90}{\sqrt{1 - \left(\frac{90}{2 \cdot 90}\right)^2}} = 104 \text{ мм.}$$

$$\frac{\Delta_{-n}}{\Delta_n} = \frac{235}{104} = 2,26.$$

5. Выбираем переход с максимально плоской частотной характеристикой.

6. Число ступенек перехода n определяется по табл. 6.7 по $R=1,22$ и Δ_{-n}/Δ_n .

Задаваясь $|\Gamma|_{\text{макс}} = 0,02$, для $R = 1,2$ и $\frac{\Delta_{-n}}{\Delta_n} = 2,401$ выбираем по табл. 6.7 $n = 3$.

7. Нормированные волновые сопротивления ступенек для $R=1,2$ и $n=3$ находим по табл. 6.6:

$$\rho_1 = 1,018; \rho_2 = 1,095, \rho_3 = 1,178.$$

8. Определяем:

а) Δ_i по формуле (6.94):

$$\Delta_1 = 131,6 \text{ мм}, \Delta_2 = 141,6 \text{ мм}, \Delta_3 = 152,3 \text{ мм};$$

б) a_i по формуле (6.95):

$$a_1 = 86,7 \text{ мм}, a_2 = 78,1 \text{ мм}, a_3 = 72,4 \text{ мм};$$

в) длины ступенек без коррекции $I_i = \frac{\Delta_i}{4}$:

$$I_1 = 32,9 \text{ мм}, I_2 = 35,4 \text{ мм}, I_3 = 38,1 \text{ мм};$$

длины ступенек с учетом коррекции в соответствии с (6.87) и (6.88):

$$I_1^0 = 33,9 \text{ мм}, I_2^0 = 36,5 \text{ мм}, I_3^0 = 39,2 \text{ мм}.$$

9. Зависимость КБВ = $f(\lambda)$ трехступенчатого перехода с нескорректированной длиной ступенек дана на рис. 6.17, где кружками отмечены экспериментально снятые точки при нагрузке линии на волновое сопротивление.

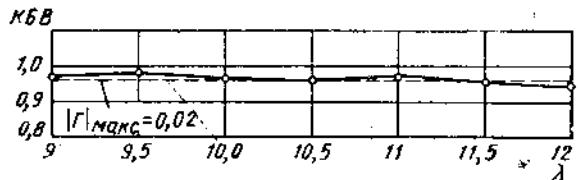


Рис. 6.17. График $\text{КБВ} = f(\lambda)$ для трехступенчатого максимально плоского перехода.

ЛИТЕРАТУРА

- Кон С. Оптимальная конструкция ступенчатого трансформатора из линий передач. «Вестник информации», Изд-во «Советское радио», 1955, № 22.
- Туровер Я. М. и Струтинский Н. И. Применение полиномов Чебышева для расчета ступенчатых переходов. «Радиотехника и электроника», 1956, т. I, № 2.
- Коллен Р. Теория и расчет широкополосных многосекционных четвертьвольновых трансформаторов. «Вопросы радиолокационной техники», 1955, № 5 (29).
- Рибле Н. Общий синтез четвертьвольновых трансформаторов полного сопротивления. «Вопросы радиолокационной техники», 1957, № 4 (40).
- Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. Изд-во «Связь», 1965.
- Young L. The Quarter-wave Transformers Prototype Circuit. Trans. IRE, 1960, v. MTT-8, Sept.
- Янг Л. Аналитическая эквивалентность направленных ответвителей, работающих в режиме колебаний типа ТЕМ, и фильтров на передающей линии со ступенчатым изменением волнового сопротивления. «Зарубежная радиоэлектроника», 1964, № 2.
- Young L. Stepped-impedance Transformers and Filter prototypes. Trans. IRE, 1962, v. MTT-10, Sept.
- Явич Л. Р. Входное сопротивление ступенчатых переходов. «Радиотехника», 1962, т. 17, № 3.
- Кириллов Л. Г., Явич Л. Р. Замечания по расчету ступенчатых переходов и направленных ответвителей с произвольным числом элементов. «Радиотехника и электроника», 1965, т. 10, № 6.
- Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. К учету емкостных эффектов при расчете ступенчатых переходов. «Радиотехника и электроника», 1960, т. 5, № 4.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ПЛАВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Плавным переходом называется неоднородная линия с непрерывно изменяющимися (вдоль координаты « x » рис. 7.1) погонными параметрами, предназначенная для согласования двух однородных линий с различными волновыми сопротивлениями. Расчет плавных переходов на основе точного решения телеграфных уравнений известен лишь для частных случаев распределения погонных параметров по длине линии [1, 2, 3]; наиболее простой результат получается для так называемого экспоненциального перехода [2], однако последний не обладает оптимальными частотными характеристиками. Новые работы [3, 4], основанные на телеграфных уравнениях, дают, в принципе, возможность расчета оптимальных переходов, но они не доведены до численных результатов.

Менее точное, но более простое исследование плавных переходов основывается на том обстоятельстве, что собственный коэффициент отражения неоднородной линии может быть приближенно представлен [5] в виде преобразования Фурье или Лапласа в функции местных отражений $N(x) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln \rho(x)$, где $\rho(x)$ — зависимость волнового сопротивления от координаты.

Использование этого приближения позволило не только расширить класс анализируемых типов плавных переходов [6, 7], но и решить ряд задач по синтезу переходов, обладающих заданными оптимальными свойствами [8, 9, 10] — вероятностных, чебышевых и др.

При расчетах монотонных¹ плавных переходов точность приближенных методов достаточна при перепадах волнового сопротивления $R < 30$ [11].

Монотонные плавные переходы имеют частотные характеристики, сходные с характеристиками фильтров верхних частот. Если на длину монотонного перехода не накладывается никаких ограничений, то любой уровень согласования в любом диапазоне частот может быть достигнут путем увеличения длины перехода.

На практике стремятся, однако, при заданных электрических параметрах иметь, по возможности, малую длину перехода. По-

следнее требование накладывает жесткие связи на все характеристики монотонного перехода [12].

Последнее время некоторое внимание уделяется также немонотонным плавным переходам [13], частотная характеристика которых имеет сходство с характеристиками полосовых фильтров. Немонотонные переходы могут быть короче монотонных, но при этом резко возрастает сложность их конфигурации [11]. Вопросы, связанные с влиянием высших типов волн в плавных переходах, рассмотрены в [14, 15]; в [15] в частности показано, что вероятностный переход обладает дополнительными оптимальными свойствами в смысле малости местных возмущений поля в волноводе с плавно изменяющимся сечением.

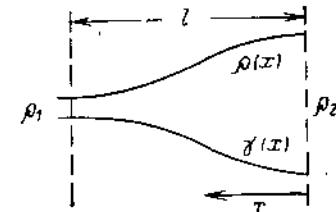


Рис. 7.1. Плавный переход.

7.2. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ПЛАВНЫЙ ПЕРЕХОД

Экспоненциальным называется переход, у которого волновое сопротивление изменяется вдоль координаты « x » по экспоненциальному закону

$$\rho(x) = \rho(0) e^{ax}, \quad (7.1)$$

где a — постоянная;

$\rho(0)$ — волновое сопротивление в начале координат.

Если принять также, что постоянная распространения $\gamma(x) = -\gamma = \text{const}$, то закон изменения волнового сопротивления имеет вид

$$\rho(x) = \rho(0) e^{(\ln R) \frac{x}{l}}. \quad (7.2)$$

В случае коаксиальной экспоненциальной линии, в которой изменение волнового сопротивления достигается путем плавного изменения диаметра $d(x)$ внутреннего проводника, имеем

$$d(x) = D \cdot e^{-2,303 \left\{ \frac{\rho(x)}{\rho(0)} \lg \frac{D}{d(0)} \right\}}, \quad (7.3)$$

где D — внутренний диаметр внешней трубы;

$d(0)$ — начальный диаметр внутренней трубы.

В волноводном варианте при плавном изменении боковой стенки расчетная формула имеет вид

$$b(x) = b(0) e^{\left\{ \ln \frac{b(l)}{b(0)} \right\} \frac{x}{l}}, \quad (7.4)$$

где $b(x)$ — высота узкой стенки прямоугольного волновода.

¹ Монотонными называются плавные переходы, в которых изменение волнового сопротивления по длине происходит монотонно.

Частотная характеристика экспоненциального плавного перехода показана на рис. 7.2; она весьма несовершена. К примеру, при перепаде волновых сопротивлений $R = 7,4$ допуск на рассогла-

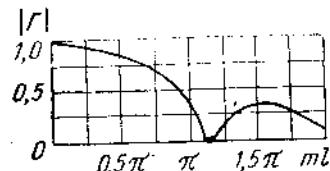


Рис. 7.2. Частотная характеристика экспоненциального плавного перехода

сование $|\Gamma|_{\max} < 0,03$ достигается лишь после пятого «всплеска» характеристики, т. е. в этом случае длина перехода должна быть порядка $2,5\Lambda_{-n}$, где Λ_{-n} — длиноволновая граница рабочего диапазона.

Длина оптимального перехода в 3—4 раза меньше. Таким образом, по габаритам экспоненциальный переход неэкономичен. Преимуществом экспоненциального перехода является простота расчета и изготовления; в коаксиальном варианте он практически совпадает с линейным конусом.

7.3. ЧЕБЫШЕВСКИЙ ПЛАВНЫЙ ПЕРЕХОД

Среди ступенчатых переходов (см. гл. 6) при прочих равных условиях, минимальную длину имеет переход с частотной характеристикой, описываемой полиномами Чебышева.

Среди плавных монотонных переходов наименьшую длину имеет плавный чебышевский переход (предельный случай ступенчатого чебышевского перехода); параметры последнего определяются путем перехода к пределу при неограниченном возрастании числа ступенек « n » и фиксированных значениях перепада R , допуска на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$ и длиноволновой границы диапазона Λ_{-n} .

Пределные соотношения имеют вид

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 \left\{ \cos \frac{2\pi l_0}{\Lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_{-n}} \right)^2} \right\}; \quad (7.5)$$

$$l_0 = \frac{\Lambda_{-n}}{2\pi} \operatorname{Arch} \frac{R-1}{2h \sqrt{R}}; \quad (7.6)$$

где по-прежнему

$$h^2 = \frac{|\Gamma|_{\max}^2}{1 - |\Gamma|_{\max}^2}; \quad (7.6a)$$

$|T_{11}|^2$ — функция рабочего затухания;

l_0 — полная длина перехода.

Сравнение частотных характеристик ступенчатого перехода и предельного ступенчатого (т. е. плавлого) перехода с чебышевской характеристикой приведено на рис. 7.3.

Закон изменения волнового сопротивления плавного чебышевского перехода определяется интегральным уравнением [11]:

$$\int_{-l_0/2}^{l_0/2} N(y) e^{-j2\pi y} dy = h \cos \left\{ \frac{2\pi l_0}{\Lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_{-n}} \right)^2} \right\}, \quad (7.7)$$

точное решение которого затруднительно.

Приближенное решение имеет вид [16]:

$$\frac{\rho(x)}{\rho(0)} = \exp \left\{ \ln R \left[\frac{x}{l_0} + \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F(m)}{m F(0)} (-1)^m \sin \left(2\pi m \frac{x}{l_0} \right) \right] \right\}, \quad (7.8)$$

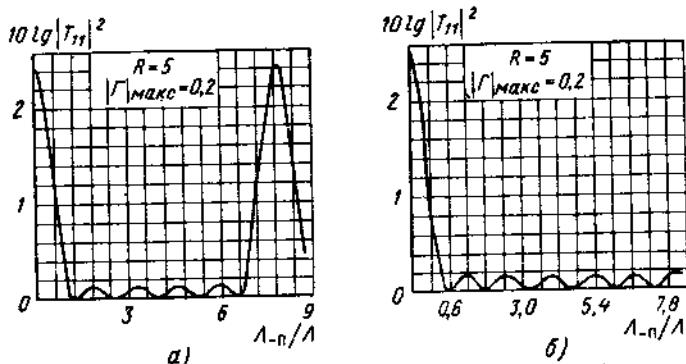


Рис. 7.3. Частотные характеристики чебышевских переходов:
а — ступенчатого перехода; б — плавного перехода.

где

$$F(m) = CQ(m) \prod_{a=1}^{\bar{a}-1} \left\{ 1 - \frac{m^2}{a^2 \left[A^2 + \left(a - \frac{1}{2} \right)^2 \right]} \right\}; \quad (7.9)$$

$$A = \frac{2l_0}{\Lambda_{-n}}; \quad a = \sqrt{\frac{\bar{a}}{A^2 + \left(\bar{a} - \frac{1}{2} \right)^2}}; \quad (7.10)$$

$$C = F(0) = \operatorname{ch} \pi A = \frac{\frac{1}{2} \ln R}{|\Gamma|_{\max}}; \quad (7.11)$$

$$Q(m) = \prod_{a=\bar{a}}^{\infty} \left(1 - \frac{m^2}{a^2} \right) = \frac{[(\bar{a}-1)!]^2}{(\bar{a}+1+m)! (\bar{a}-1-m)!}, \quad (7.12)$$

где a — текущее значение индекса, имеющего фиксированную величину \bar{a} (о выборе \bar{a} см. [16]).

Таблица 7.1

Волновое сопротивление плавных чебышевских переходов

$\frac{x}{l_0}$	R	$\frac{1}{13}$	$\frac{2}{13}$	$\frac{3}{13}$	$\frac{4}{13}$	$\frac{5}{13}$	$\frac{6}{13}$	$\frac{7}{13}$	$\frac{8}{13}$	$\frac{9}{13}$	$\frac{10}{13}$	$\frac{11}{13}$	$\frac{12}{13}$	$\frac{13}{13}$
1,2	1,00988	1,01989	1,03183	1,04692	1,06493	1,08498	1,10601	1,12683	1,14622	1,16288	1,17659	1,18826	1,2	
1,4	1,01271	1,02843	1,05043	1,08028	1,11750	1,16038	1,20649	1,25280	1,25959	1,33278	1,36129	1,38243	1,4	
1,6	1,01465	1,03481	1,06527	1,10235	1,16377	1,22939	1,30146	1,37484	1,44358	1,50197	1,54618	1,57689	1,6	
1,8	1,01614	1,03996	1,07776	1,12054	1,18284	1,24356	1,29336	1,39172	1,49320	1,58892	1,67012	1,73084	1,77140	1,8
2,0	1,01735	1,04429	1,08861	1,15468	1,24356	1,35322	1,47795	1,60828	1,73208	1,83720	1,91517	1,96589	2,0	
2,2	1,01836	1,04801	1,09821	1,17443	1,27876	1,40962	1,49662	1,64039	1,82992	1,92992	1,99952	1,99952	2,2	
2,4	1,01923	1,05134	1,06941	1,19250	1,25552	1,31153	1,46306	1,60936	1,71738	1,93706	1,95025	1,95025	2,4	
2,6	1,01999	1,05429	1,11457	1,20916	1,34224	1,51393	1,79194	1,94204	2,04204	2,28637	2,49587	2,64911	2,6	
2,8	1,02066	1,05696	1,12185	1,22465	1,37118	1,56225	1,79194	1,94204	2,04204	2,28637	2,49587	2,64911	2,8	
3,0	1,02126	1,05938	1,12848	1,28948	1,39556	1,60916	1,86432	1,94505	1,94505	1,94505	1,94505	1,94505	3,0	
3,2	1,02181	1,06162	1,13464	1,25270	1,42559	1,65399	1,93472	1,94627	1,95447	1,95447	1,95447	1,95447	3,2	
3,4	1,02231	1,06368	1,14039	1,26555	1,44939	1,69719	1,94719	1,95331	1,95812	1,96664	1,98144	1,98144	3,4	
3,6	1,02271	1,06560	1,14578	1,27766	1,47311	1,73893	1,97024	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	3,6	
3,8	1,02319	1,06739	1,15086	1,28918	1,49584	1,77939	1,97939	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	3,8	
4,0	1,02358	1,06906	1,15566	1,30016	1,51769	1,81849	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	4,0	
4,2	1,02395	1,07064	1,16021	1,31064	1,53871	1,85553	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	4,2	
4,4	1,02430	1,07214	1,16453	1,32067	1,55901	1,89452	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	4,4	
4,6	1,02462	1,07355	1,16865	1,33029	1,57859	1,92953	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	4,6	
4,8	1,02492	1,07489	1,17259	1,33954	1,59755	1,96464	1,98438	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	4,8	
5,0	1,02521	1,07617	1,17636	1,34845	1,61593	1,98991	1,98991	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	5,0	
5,2	1,02548	1,07739	1,17997	1,35703	1,63375	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	5,2	
5,4	1,02574	1,07855	1,18344	1,36532	1,65107	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	1,98716	5,4	

Продолжение табл. 7.1

$\frac{x}{l_0}$	R	$\frac{1}{13}$	$\frac{2}{13}$	$\frac{3}{13}$	$\frac{4}{13}$	$\frac{5}{13}$	$\frac{6}{13}$	$\frac{7}{13}$	$\frac{8}{13}$	$\frac{9}{13}$	$\frac{10}{13}$	$\frac{11}{13}$	$\frac{12}{13}$	$\frac{13}{13}$
5,6	1,02599	1,07967	1,18678	1,37333	1,66791	2,09713	2,67032	3,35749	4,07768	4,71866	5,18676	5,45813	5,6	
5,8	1,02623	1,08074	1,18999	1,38109	1,68430	2,12849	2,72494	3,44356	4,19959	4,87337	5,36668	5,65176	5,8	
6,0	1,02645	1,08177	1,19310	1,38861	1,70027	2,15922	2,77878	3,58884	4,23087	5,02893	5,54646	5,84537	6,0	
6,2	1,02667	1,08276	1,19609	1,39550	1,71585	2,18936	2,83187	3,61337	4,4457	5,18363	5,72611	6,03894	6,2	
6,4	1,02688	1,08371	1,19899	1,40299	1,73105	2,18942	2,88426	3,69714	4,56169	5,38778	5,90562	6,32349	6,4	
6,6	1,02708	1,08463	1,20180	1,40987	1,74590	2,24798	2,93597	3,78028	4,68127	5,49176	6,05016	6,42601	6,6	
6,8	1,02727	1,08552	1,20475	1,41658	1,76041	2,27651	2,98703	3,86273	4,80031	5,64540	6,26427	6,61950	6,8	
7,0	1,02745	1,08638	1,20716	1,42310	1,77461	2,30455	3,03747	3,94553	4,91883	5,79874	6,44342	6,81297	7,0	
7,2	1,02763	1,08721	1,20972	1,42946	1,78850	2,33213	3,08731	3,98271	4,92571	5,83687	6,95178	6,62245	7,2	
7,4	1,02780	1,08802	1,21221	1,43566	1,80211	2,35926	3,13657	4,06315	4,10454	6,90187	7,9984	7,9984	7,4	
7,6	1,02797	1,08880	1,21463	1,44172	1,81544	2,38597	3,16529	4,18631	4,27149	6,92570	6,98018	7,39323	7,6	
7,8	1,02813	1,08955	1,21639	1,44763	1,82155	2,41227	3,23347	4,27576	4,38812	4,40925	6,75889	7,58861	7,8	
8,0	1,02829	1,09034	1,21949	1,45341	1,83434	2,43818	3,28114	4,34467	4,50431	6,56121	7,33749	7,79996	8,0	
8,2	1,02843	1,09101	1,22153	1,45905	1,85392	2,4637	3,32831	4,42305	4,62008	6,71291	7,51600	7,97330	8,2	
8,4	1,02858	1,09170	1,22337	1,46458	1,86628	2,4888	3,37501	4,50093	4,73543	6,86437	7,69440	8,16661	8,4	
8,6	1,02872	1,09238	1,22584	1,46999	1,87842	2,51370	3,4225	4,57832	5,80397	7,01560	7,87272	8,35990	8,6	
8,8	1,02886	1,09304	1,22792	1,47528	1,89034	2,53819	3,46704	4,65324	5,96495	7,16658	8,05094	8,55318	8,8	
9,0	1,02899	1,09368	1,22949	1,48048	1,90207	2,56235	3,51240	4,73169	6,07913	7,31735	8,2907	8,74643	9,0	
9,2	1,02912	1,09431	1,23194	1,48556	1,91360	2,58203	3,55734	4,80769	6,19294	7,46789	8,40711	8,93967	9,2	
9,4	1,02925	1,09492	1,23388	1,49055	1,92494	2,60957	3,60187	4,88325	6,30639	7,61821	8,58507	9,13289	9,4	
9,6	1,02937	1,09552	1,23579	1,49545	1,93611	2,63301	3,64601	4,95839	6,41948	7,76295	8,73609	9,32609	9,6	
9,8	1,02949	1,09611	1,23765	1,50025	1,94710	2,65599	3,68975	5,03312	5,53224	7,91823	8,94074	9,51927	9,8	
10,0	1,02961	1,09668	1,23947	1,50497	1,95793	2,67868	3,73316	5,10744	6,44465	8,06794	9,11845	9,71243	10,0	

| $\Gamma_{\max} = 0,05$

$\frac{x}{l_0}$	R	1 $\frac{1}{13}$	2 $\frac{2}{13}$	3 $\frac{3}{13}$	4 $\frac{4}{13}$	5 $\frac{5}{13}$	6 $\frac{6}{13}$	7 $\frac{7}{13}$	8 $\frac{8}{13}$	9 $\frac{9}{13}$	10 $\frac{10}{13}$	11 $\frac{11}{13}$	12 $\frac{12}{13}$	13 $\frac{13}{13}$
1,2	1,04792	1,06953	1,07315	1,07568	1,08189	1,09065	1,10026	1,10917	1,11557	1,11820	1,12198	1,14513	1,2	
1,4	1,05619	1,08852	1,10505	1,12209	1,14411	1,16971	1,19636	1,22366	1,24766	1,26691	1,28615	1,32552	1,4	
1,6	1,06225	1,10942	1,13094	1,16160	1,19926	1,24221	1,28863	1,33416	1,37744	1,41474	1,45041	1,50624	1,6	
1,8	1,06704	1,15111	1,15296	1,19634	1,24918	1,30954	1,37453	1,44094	1,50459	1,56119	1,61419	1,68692	1,8	
2,0	1,07099	1,12588	1,17220	1,22748	1,29501	1,37263	1,45706	1,54339	1,62935	1,70619	1,77733	1,86743	2,0	
2,2	1,07435	1,13433	1,18932	1,25580	1,33749	1,43215	1,53615	1,64486	1,75187	1,84979	1,93985	2,04775	2,2	
2,4	1,07727	1,14195	1,20477	1,28182	1,37719	1,48862	1,62231	1,76268	1,87234	1,99208	2,10167	2,22786	2,4	
2,6	1,07984	1,14897	1,21885	1,30592	1,41450	1,54244	1,68564	1,83861	1,99093	2,10301	2,26290	2,40776	2,6	
2,8	1,08214	1,15533	1,23180	1,32839	1,44976	1,59393	1,75666	1,93136	1,07812	1,27399	2,42355	2,58745	2,8	
3,0	1,08422	1,16114	1,24380	1,34947	1,48321	1,64334	1,82555	1,02264	2,22310	2,41196	2,58356	2,76696	3,0	
3,2	1,08611	1,16650	1,25498	1,36932	1,51598	1,69090	1,89248	1,12101	2,36932	2,54985	2,74325	2,94628	3,2	
3,4	1,08785	1,17468	1,26544	1,38810	1,54553	1,73678	1,95764	1,999	2,44939	2,68681	2,90236	3,12544	3,4	
3,6	1,08945	1,17608	1,27528	1,40593	1,57470	1,78114	1,21182	1,28615	2,56058	2,88291	3,06102	3,30442	3,6	
3,8	1,09093	1,18040	1,28456	1,42291	1,60273	1,82411	1,20832	1,37096	2,67059	2,95852	3,21924	3,48325	3,8	
4,0	1,09232	1,18446	1,29336	1,49312	1,62270	1,86580	2,14385	2,45444	2,77948	3,09227	3,37706	3,66194	4,0	
4,2	1,09361	1,18829	1,30172	1,45464	1,65572	1,90632	2,20320	2,53666	2,88732	3,22651	3,53448	3,84048	4,2	
4,4	1,09483	1,19191	1,30968	1,46952	1,68086	1,94574	2,26134	2,61770	2,99417	3,35961	3,69155	4,01889	4,4	
4,6	1,09588	1,19535	1,31727	1,48383	1,70519	1,98416	2,31836	2,69764	3,10008	3,49206	3,84826	4,19717	4,6	
4,8	1,09706	1,19861	1,32454	1,49761	1,72878	1,92163	2,37432	2,77665	3,20511	3,62389	4,00464	4,37533	4,8	
5,0	1,09809	1,20172	1,33151	1,51090	1,75166	1,95822	2,42928	2,85443	3,30929	3,75512	4,16069	4,56337	5,0	
5,2	1,09906	1,20469	1,33882	1,52373	1,77390	2,03938	2,48331	2,93139	3,41267	3,88579	4,31645	4,73130	5,2	
5,4	1,09999	1,207541	1,34465	1,53615	1,79553	2,12897	2,53644	3,00746	3,51528	4,01592	4,47191	4,90913	5,4	

Продолжение табл. 7.1

$\frac{x}{l_0}$	R	1 $\frac{1}{13}$	2 $\frac{2}{13}$	3 $\frac{3}{13}$	4 $\frac{4}{13}$	5 $\frac{5}{13}$	6 $\frac{6}{13}$	7 $\frac{7}{13}$	8 $\frac{8}{13}$	9 $\frac{9}{13}$	10 $\frac{10}{13}$	11 $\frac{11}{13}$	12 $\frac{12}{13}$	13 $\frac{13}{13}$
5,6	1,10088	1,21026	1,35085	1,54818	1,81659	1,93212	1,63322	2,58874	3,08269	3,61715	4,14553	4,62709	5,08685	5,6
5,8	1,10173	1,21288	1,35684	1,55984	1,83713	1,92678	1,64023	2,57464	3,07543	3,71833	4,27464	4,78200	5,25447	5,8
6,0	1,10254	1,21540	1,36222	1,57116	1,85716	1,92968	1,66997	2,57074	3,08183	3,81710	4,30284	4,93665	5,44199	6,0
6,2	1,10332	1,21782	1,36822	1,58218	1,87167	1,92619	1,67469	2,57364	3,09186	3,81869	4,30155	4,91015	5,61943	6,2
6,4	1,10406	1,22016	1,37363	1,59286	1,89583	1,92936	1,67930	2,57934	3,07364	3,81793	4,65918	5,24521	5,71678	6,4
6,6	1,10478	1,22242	1,37888	1,60328	1,91452	1,93472	1,69366	2,83996	3,44735	3,11656	4,78648	5,39914	5,97404	6,6
6,8	1,10547	1,22460	1,38398	1,61343	1,92280	1,93539	1,70512	2,88699	3,51821	4,21463	4,91336	5,55284	6,15121	6,8
7,0	1,10614	1,22671	1,38893	1,62332	1,95071	1,93849	1,73298	2,88444	3,58844	4,31214	4,03985	5,70632	6,32831	7,0
7,2	1,10678	1,22875	1,39374	1,63298	1,96825	1,94509	1,74505	2,98126	3,65806	4,16595	4,89595	5,80533	6,38834	7,2
7,4	1,10741	1,23074	1,39842	1,64241	1,96545	1,94422	1,75721	2,97543	3,64055	4,17046	4,89595	5,81266	6,68228	7,4
7,6	1,10801	1,23266	1,40298	1,65163	1,96232	1,94729	1,76329	3,07329	3,79559	4,160152	4,417046	4,65533	6,88915	7,6
7,8	1,10859	1,24150	1,42413	1,66042	1,96888	1,95018	1,76118	3,08223	3,79466	4,13019	4,54205	5,31821	7,03895	7,8
8,0	1,10919	1,23634	1,41175	1,66946	1,95142	1,95290	1,76326	3,03094	3,79198	4,66672	4,47069	5,21268	8,0	
8,2	1,10971	1,23811	1,41598	1,67808	1,95112	1,95649	1,76721	3,0752	3,99784	4,88652	5,79106	6,62300	7,38834	8,2
8,4	1,11024	1,23983	1,42010	1,68654	1,96680	1,95837	1,77132	3,05324	3,97539	4,80426	5,91507	6,77513	6,56694	8,4
8,6	1,11076	1,24150	1,42413	1,69482	1,96982	1,95018	1,77432	3,06426	3,97539	4,80426	5,91507	6,77513	6,56694	8,6
8,8	1,11126	1,24314	1,42807	1,70294	1,96740	1,96364	1,77538	3,07429	3,97539	4,80426	5,91507	6,77513	6,56694	8,8
9,0	1,11175	1,24473	1,43192	1,71090	1,96132	1,96266	1,77632	3,08008	4,26069	5,26038	6,28557	7,23049	8,09557	9,0
9,2	1,11222	1,24628	1,43569	1,71872	1,97023	1,96886	1,78217	4,32529	5,35283	6,40808	7,38196	8,27177	9,2	
9,4	1,11269	1,24780	1,43938	1,72639	1,94149	1,71373	1,78466	4,36387	5,43946	6,44490	7,53060	8,53327	8,44802	9,4
9,6	1,11314	1,24928	1,44299	1,73392	1,95575	1,73880	1,78503	5,0518	4,45321	5,65659	6,65442	7,62426	9,6	
9,8	1,11358	1,25073	1,44653	1,74132	1,96972	1,76357	1,78672	5,4613	4,51657	5,62791	6,77483	7,83543	8,80045	9,8
10,0	1,11401	1,25214	1,45000	1,74859	1,83663	2,78806	3,58672	4,57954	5,71888	6,89555	7,98659	8,97658	10,0	

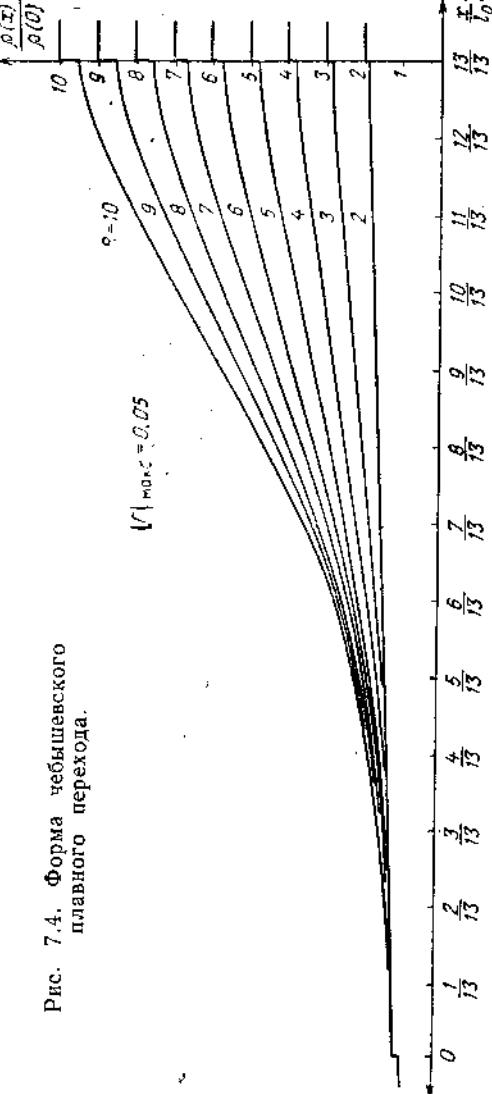


Рис. 7.4. Форма чебышевского плавного перехода.

С помощью (7.8—7.12) табулируются численные значения волновых сопротивлений плавных чебышевских переходов для двух допусков на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$ и $\sigma = 20$ (табл. 7.1).

Профиль переходов, рассчитанных с помощью табл. 7.1 показан на рис. 7.4. Из рис. 7.4 видно, что характерной особенностью чебышевских плавных переходов являются скачки волнового сопротивления в начале и конце перехода; коэффициент отражения такого скачка равен $\Gamma = \frac{h}{2}$, что обеспечивает равномерную осцилляцию частотной характеристики с заданным уровнем h в полубесконечной полосе пропускания (рис. 7.3).

Упрощенные соотношения (7.8) — (7.12) имеют вид [16]:

$$\frac{\rho(x)}{\rho(0)} = \exp \left\{ \ln R \left[\frac{x}{l_0} - \frac{1}{\pi} \frac{F(1)}{F(0)} \sin \left(2\pi \frac{x}{l_0} \right) \right] \right\}, \quad (7.13)$$

где

$$\frac{F(1)}{F(0)} = \prod_{a=\bar{a}}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{a^2} \right) \prod_{a=1}^{\bar{a}-1} \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma^2 \left[A^2 + \left(a - \frac{1}{2} \right)^2 \right]} \right\}. \quad (7.14)$$

Переход, описываемый соотношениями (7.13) и (7.14), близок к так называемому компенсированному переходу (см. далее § 7.4).

Более простой способ расчета плавного чебышевского перехода основан на том, что предельный чебышевский переход практически тождествен ступенчатому чебышевскому переходу с весьма большим (практически 20—30) числом ступеней. В последнем же случае имеются общие выражения для местных коэффициентов отражения (см. (6.41) и (6.45)). Таким образом, табл. 6.3—6.5 для чебышевского перехода при $n = 20$ можно использовать и для построения плавного перехода.

7.4. КОМПЕНСИРОВАННЫЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ПЕРЕХОД

Характеристика, близкая к чебышевской, может быть сформирована путем некоторых улучшений экспоненциальной линии. Компенсированным экспоненциальным переходом называется переход, у которого функция местных отражений задана в виде тригонометрического двучлена; первый его член соответствует экспоненциальной линии;

$$N(x) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln \rho(x) = \begin{cases} \frac{a_0}{2} + a_1 \cos 2\pi \frac{x}{l_0} & (0 \leq x \leq l_0) \\ 0 & (x < 0; x > l_0), \end{cases} \quad (7.15)$$

где l_0 — полная длина перехода.

При

$$\frac{2a_1}{a_0} = -0.840 \quad (7.16)$$

максимум первого выброса, отнесенный к $\frac{1}{2} \ln R$, имеет минимум, равный

$$\frac{|\Gamma|_{\max}}{\frac{1}{2} \ln R} = 0,005, \quad (7.17)$$

а относительная длина перехода приобретает характерное значение

$$\frac{t}{\Lambda - n} = 1. \quad (7.18)$$

Частотная характеристика перехода, соответствующего условиям (7.16) и (7.17), изображена на рис. 7.5. При смягчении допуска на

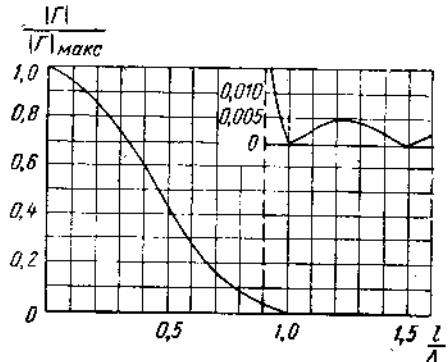


Рис. 7.5. Частотная характеристика компенсированного перехода.

рассогласование длина компенсированного перехода заметно уменьшается. Например, представляет практический интерес следующий вариант:

$$\left. \begin{aligned} \frac{|\Gamma|_{\max}}{\frac{1}{2} \ln R} &= 0,03; \quad \frac{t}{\Lambda - n} = 0,75; \\ \frac{2a_1}{a_0} &= -0,632. \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

Таким образом, компенсирующее слагаемое в экспоненциальной линии весьма эффективно; оно уменьшает длину линии (при одинаковом допуске на рассогласование) примерно в три раза. По своим свойствам компенсированный переход незначительно уступает чебышевскому, что иллюстрируется рис. 7.6. и нижеследующим примером:

Пример. При $R = e^2 \approx 7,389$ и $|\Gamma|_{\max} = 0,005$ имеем для чебышевского перехода

$$\frac{t}{\Lambda - n} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Ar ch} \frac{R-1}{2h\sqrt{R}} = \frac{1}{6,28} \operatorname{Ar ch} \frac{7,389-1}{2 \cdot 0,005 \sqrt{7,389}} = 0,98,$$

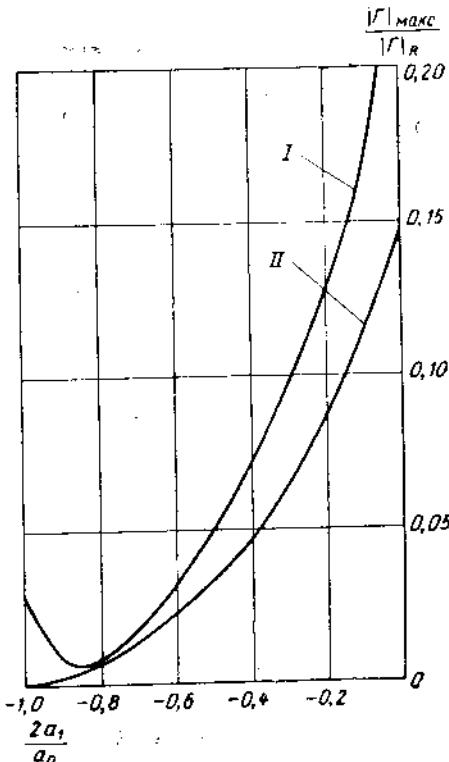


Рис. 7.6. Сравнение параметров плавных переходов:
1 — Компенсированный переход, 2 — Чебышевский переход.

что на 2% короче соответствующей длины компенсированного перехода [см. (7.18)].

При $R = 7,389$ и $|\Gamma|_{\max} = 0,03$ чебышевский переход имеет

длину

$$\frac{t}{\Lambda - n} = \frac{1}{6,28} \operatorname{Ar ch} 39,3 \approx 0,7,$$

что на 6% короче компенсированного перехода.

Расчетные формулы для компенсированного перехода сведены в табл. 7.2

Сводка расчетных соотношений для комплексированного перехода. Таблица 7.2

Допуск на согласование Γ_{\max} $\frac{1}{2} \ln R$	0,005	0,003
Длина плавного перехода $\frac{\rho(x)}{\rho(0)}$	$\lambda_{\text{пл}}$	$0,75 \lambda_{\text{пл}}$
Волновое сопротивление $\frac{\rho(x)}{\rho(0)}$	$\exp \left\{ \ln \frac{\rho(l)}{\rho(0)} \left[\frac{x}{l} - 0,133 \sin 2\pi \frac{x}{l} \right] \right\}$	$\exp \left\{ \ln \frac{\rho(l)}{\rho(0)} \left[\frac{x}{l} - 0,100 \sin 2\pi \frac{x}{l} \right] \right\}$
Диаметр внутреннего проводника коаксиального перехода $d(x)$	D $\exp \left\{ 2,303 \frac{d(x)}{d(0)} \lg \frac{D}{d(0)} \right\}$	То же
Высота узкой стены волноводного перехода $\frac{b(x)}{b(0)}$	$\exp \left\{ \ln \frac{b(l)}{b(0)} \left[\frac{x}{l} - 0,133 \sin 2\pi \frac{x}{l} \right] \right\}$	$\exp \left\{ \ln \frac{b(l)}{b(0)} \left[\frac{x}{l} - 0,100 \sin 2\pi \frac{x}{l} \right] \right\}$
Модуль коэффициента отражения $ S_{11} $	$\frac{1}{2} \ln \frac{\rho(l)}{\rho(0)} \left\{ \frac{\sin ml}{ml} - 0,840 \frac{ml \sin ml}{(ml)^2 - \pi^2} \right\}$	$\frac{1}{2} \ln \frac{\rho(l)}{\rho(0)} \left\{ \frac{\sin ml}{ml} - 0,632 \frac{ml \sin ml}{(ml)^2 - \pi^2} \right\}$

7.5. ПРЕДЕЛЬНЫЙ ПЕРЕХОД С МАКСИМАЛЬНО ПЛОСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ (ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПЛАВНЫЙ ПЕРЕХОД)

Переход к пределу в ступенчатом чебышевском переходе дает плавный чебышевский переход (см. выше § 7.3). Аналогично переход к пределу в ступенчатом переходе с максимально плоской частотной характеристикой приводит к так называемому вероятностному плавному переходу [11].

Расчетные соотношения имеют вид:

а) функция рабочего затухания

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 \left\{ \frac{1}{C_1} e^{-\left(\frac{\Lambda-\mu}{\Lambda}\right)^2 \ln \frac{1}{C_1}} \right\}^2, \quad (7.20)$$

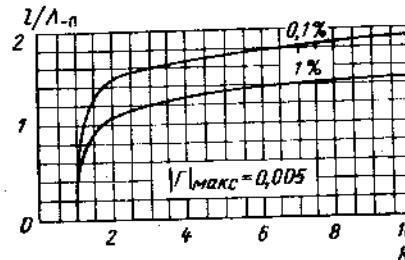


Рис. 7.7. Зависимость длины вероятностного перехода от R .

где

$$C_1 = \frac{2h \sqrt{R}}{R-1}, \quad (7.21)$$

а h определяется из (7.6а);

б) закон изменения волнового сопротивления

$$\frac{\rho(y)}{\rho(0)} = \exp \left\{ \frac{1}{2} \ln R \operatorname{erf} C_2 \frac{y}{\Lambda - \mu} \right\}, \quad (7.22)$$

где

$$C_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{2} \ln R}}; \quad (7.23)$$

y — координата, отсчитываемая от центра перехода;

$$\operatorname{erf} f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt;$$

в) полная длина

$$l_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\Lambda_{-n}}{2\pi} n \arccos \sqrt[n]{C_1} \right\} \rightarrow \infty. \quad (7.24)$$

Таким образом, в отличие от предельного чебышевского перехода предельный переход с максимально плоской характеристикой требует для точной реализации бесконечной длины. Иначе говоря, точная реализация плавного перехода с максимально плоской характеристикой невозможна; необходимость ограничить его длину приводит к некоторым выбросам в полосе пропускания. При достаточноной длине перехода их можно свести к любой малой величине. На рис. 7.7 даны графики относительной длины перехода l_0/Λ_{-n} в зависимости от перепада волнового сопротивления на концах перехода и при допустимой погрешности в реализации этого перепада в 0,1 и 1% (т. е. при определенных границах «отсечения» полу- бесконечных отрезков на концах перехода).

7.6. ПРИМЕРЫ

Пример 1. Рассчитать плавный переход, соединяющий волновод сечением 72×34 мм с волноводом сечением 72×10 мм. Границная длина волны полосы пропускания $\lambda_{-n} = 12$ см, допуск на

рассогласование в этой полосе $\frac{|\Gamma|_{\max}}{\frac{1}{2} \ln R} = 0,005$.

1. Определяем перепад волновых сопротивлений

$$R = \frac{r(l)}{r(0)} = \frac{b(l)}{b(0)} = \frac{34}{10} = 3,4.$$

2. Выбираем компенсированный экспоненциальный переход (см. § 7.4), габариты которого практически не уступают чебышевскому.

Длина перехода в соответствии с (7.18)

$$l = \Lambda_{-n} = 217 \text{ мм};$$

так как

$$\Lambda_{-n} = \sqrt{\frac{\lambda_{-n}}{1 - \left(\frac{\lambda_{-n}}{2a}\right)^2}} = \sqrt{\frac{120}{1 - \left(\frac{120}{144}\right)^2}} = 217 \text{ мм.}$$

3. Зависимость высоты волновода $b(x)$ от координаты определяется формулой из табл. 7.2:

$$\frac{b(x)}{b(0)} = \exp \left\{ \ln \frac{b(l)}{b(0)} \left[\frac{x}{l} - 0,133 \sin 2\pi \frac{x}{l} \right] \right\}.$$

Подставляя в последнюю формулу $\frac{b(l)}{b(0)} = 3,4$, рассчитываем $\frac{b(x)}{b(0)}$ для значений $\frac{x}{l} = 0 \div 1$; результаты сводим в таблицу:

$\frac{x}{l}$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$\frac{b(x)}{b(0)}$	1,000	1,011	1,027	1,052	1,094	1,154	1,237

$\frac{x}{l}$	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
$\frac{b(x)}{b(0)}$	1,344	1,483	1,650	1,844	2,061	2,293	2,529

$\frac{x}{l}$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\frac{b(x)}{b(0)}$	2,748	2,948	3,105	3,228	3,310	3,364	3,400

4. Умножая найденную величину $\frac{b(x)}{b(0)}$ на $b(0) = 10$ мм, а также величину $\frac{x}{l}$ на $l = 217$ мм, строим профиль плавного волноводного перехода (рис. 7.8, а)

Пример 2. Рассчитать плавный переход, соединяющий коаксиальную линию сечением 30/20 мм с коаксиальной линией сечением 30/9 мм. Границная длина волны полосы пропускания $\lambda_{-n} = 82$ мм, допуск на рассогласование в этой полосе $\frac{|\Gamma|_{\max}}{\frac{1}{2} \ln R} = 0,005$.

1. Определим перепад волновых сопротивлений

$$r(0) = 138 \lg \frac{D}{d(0)} = 138 \lg \frac{30}{20} = 24,3 \text{ ом},$$

$$r(l) = 138 \lg \frac{D}{d(l)} = 138 \lg \frac{30}{9} = 72 \text{ ом}.$$

следовательно,

$$R = \frac{72}{24,3} \approx 3.$$

2. Выбираем снова компенсированный экспоненциальный переход; длина его при заданном допуске составляет [см. (7.18)]

$$l = \lambda_{-n} = 82 \text{ мм.}$$

3. Зависимость $\frac{\rho(x)}{\rho(0)}$ находим по формулам табл. 7.2. Диаметр внутреннего проводника

$$d(x) = \frac{D}{\exp \left\{ 2,303 \frac{\rho(x)}{\rho(0)} \lg \frac{D}{d(0)} \right\}}$$

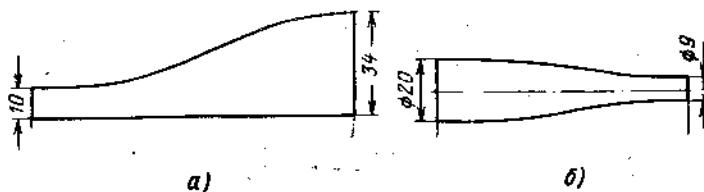


Рис. 7.8. Профиль компенсированного плавного перехода.

Расчет по этой формуле дает профиль внутреннего проводника коаксиальной линии, изображенный на рис. 7.8, б.

7.7. СРАВНЕНИЕ СТУПЕНЧАТЫХ И ПЛАВНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Частотная характеристика ступенчатого перехода представляет собой тригонометрический полином, в то время как соответствующая характеристика плавного перехода в первом приближении описывается интегралом Фурье. Эти обстоятельства определяют основные свойства сравниваемых характеристик. В характеристики ступенчатого перехода полосы пропускания и заграждения периодически чередуются. В характеристики плавного перехода полосы заграждения находятся в области низких частот, а полоса пропускания, начинаясь от некоторой частоты f_{-n} , простирается $f_n \rightarrow \infty$. Частота f_{-n} тем ниже, чем больше длина плавного перехода.

При предельном переходе от ступенчатого перехода к плавному совмещаются их нижние граничные частоты f_{-n} и величины R . $|\Gamma|_{\max}$ принимаются одинаковыми. В этом случае интервал между соседними «пиками» частотной характеристики ступенчатого перехода при $n \rightarrow \infty$ неограниченно растет; длина монотонного ступенчатого перехода при этом также возрастает.

В случае чебышевского перехода это возрастание имеет предел

$$\frac{l_0}{\Lambda_{-n}} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Ar} \operatorname{ch} \frac{R-1}{2h\sqrt{R}}, \quad (7.2)$$

где

$$h^2 = \frac{|\Gamma|_{\max}^2}{1 - |\Gamma|_{\max}^2}.$$

На рис. 7.9 а, б даны зависимости, позволяющие провести сравнение длины ступенчатых и плавных переходов с чебышевской характеристикой.

Кривые рис. 7.9 дают зависимость длины ступенчатого и предельного ступенчатого перехода (плавного перехода) от перепада волнового сопротивления R при $|\Gamma|_{\max} = 0,02$ и $0,2$.

Рис. 7.10 иллюстрирует зависимость длины плавного перехода от R и $|\Gamma|_{\max}$.

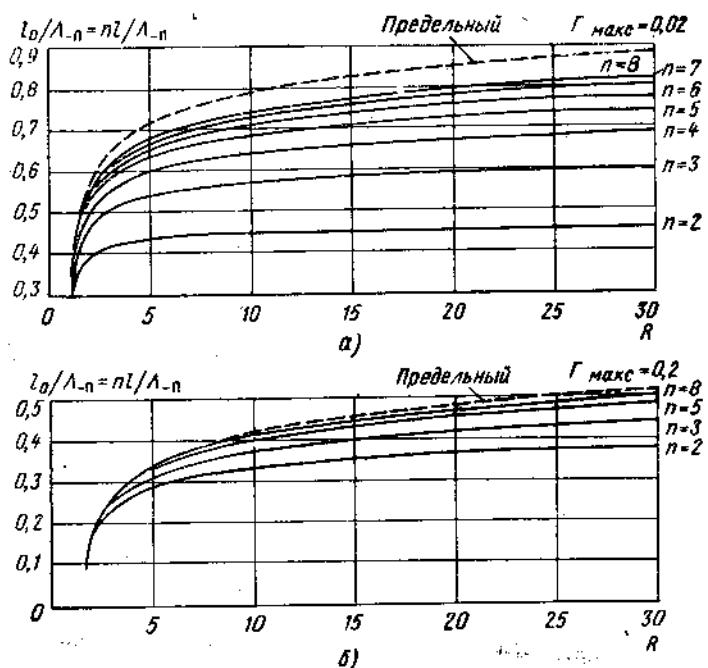


Рис. 7.9. Зависимость длины ступенчатых и плавных чебышевских переходов от R .

Из указанных рисунков следует, что при одинаковом допуске на рассогласование, перепаде волнового сопротивления и граничной длине волны Λ_{-n} длина плавного перехода всегда больше, чем ступенчатого. Физический смысл этой закономерности состоит, по-видимому, в том, что с помощью ступенчатого перехода заданные технические требования выполняются более экономно, чем с помощью плавного перехода. Действительно, в практических задачах требуемая полоса согласования, как правило, ограничена с двух сторон и нет нужды превышать эти требования. В случае монотонного плавного перехода запас по полосе неизбежен; увеличение длины является следствием этих неиспользованных резервов.

При повышенных требованиях к электрической прочности плавный переход предпочтительнее, чем ступенчатый. Кроме того, если в системе осуществляется перекрытие в несколько октав (например, для ГСС), то соответствующий ступенчатый переход должен содержать 15—20 ступенек; практически это уже плавный переход.

Ступенчатый переход обычно можно выполнить с большей степенью точности, чем плавный.

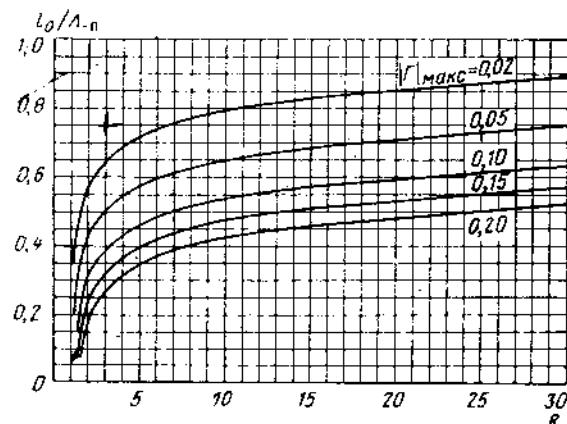


Рис. 7.10. Зависимость длины плавного чебышевского перехода от R и $|\Gamma|_{\text{макс}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольперт А. Р. Линии с неравномерно распределенными параметрами. «Электросвязь», 1940, № 2.
2. Нейман М. С. Неоднородные линии с распределенными постоянными. ИЭСТ, 1938, № 11.
3. Литвиненко О. Н. Сошников В. И. Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. Изд. «Советское радио», 1964.
4. Литвиненко О. Н. Сошников В. И. Расчет формирующих линий. Киев, Гостехиздат УССР, 1962.
5. Фельдштейн А. Л. Неоднородные линии. «Радиотехника», 1951, т. 6, № 5.
6. Фельдштейн А. Л. Синтез неоднородных линий по заданным частотным характеристикам. «Радиотехника», 1952, т. 7, № 6.
7. Фельдштейн А. Л. Некоторые задачи синтеза неоднородных линий. «Радиотехника», 1958, т. 13, № 8.
8. Фельдштейн А. Л. К расчету оптимального плавного перехода. «Радиотехника», 1959, т. 14 № 3.
9. Klopstein R. W. A transmission line tape of improved design. «Proc. IRE», 1956, v. 44, № 1.
10. Collin R. E. The optimum tapered transmission line matching section. Proc. IRE, 1956, v. 44, № 4.
11. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. Изд-во «Связь», 1965.
12. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Наименьшая возможная длина плавного перехода. «Радиотехника и электроника», 1959, т. 4, № 9.
13. Солимар Л. Об оптимальном расчете неоднородных линий передачи. Proc IEE, 1960, 107C, p 100.
14. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. Изд. АН СССР, 1961.
15. Герценштейн М. Е. К теории плавных переходов с «гарантированным согласованием». «Радиотехника и электроника», 1959, т. 4, № 9.
16. Явич Л. Р. К синтезу плавных чебышевских переходов. «Радиотехника и электроника», 1965, т. 10, № 8.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ФИЛЬТРЫ С ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМИ СВЯЗЯМИ

8.1. ИСХОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Фильтры диапазона СВЧ обычно представляют собой каскадное соединение объемных резонаторов. Получили распространение два способа включения резонаторов в цепочку: непосредственное (фильтры с непосредственными связями — рис. 8.1), с помощью



Рис. 8.1. Схематическое изображение фильтра с непосредственными связями между резонаторами.

отрезков линий (фильтры с четвертьволновыми связями — рис. 8.2). Ниже рассматривается второй способ. Фильтры с непосредственными связями описаны в гл. 9.

К преимуществам фильтров с четвертьволновыми связями относится удобство их настройки, которая может осуществляться позлементно.

К недостаткам — большие габариты, а также ограничения по полосе частот (не более 10—15%), в которой сохраняется приемлемая точность расчета. Рассматриваются два класса фильтров СВЧ: полосно-пропускающие (ППФ) и полосно-загражающие (ПЗФ).

Метод расчета включает в себя два этапа: сначала рассчитывается некоторая, принятая в качестве прототипа, схема из LC элементов, далее этой схеме ставится в соответствие фильтр СВЧ и определяются параметры всех его объемных резонаторов. Прототипом принят полосно-пропускающий¹ фильтр, изображенный на

¹ В классической теории LC -фильтров [1, 2] прототипом выбирают обычно фильтр нижних частот, а полосно-пропускающий фильтр является производным. В диапазоне СВЧ удобнее избрать прототипом непосредственно ППФ; производным от него будет ПЗФ.

рис. 8.3; задачей его расчета является определение нагруженных добротностей Q контуров по заданной частотной характеристике рабочего затухания (собственная добротность контуров предполагается при этом бесконечной).

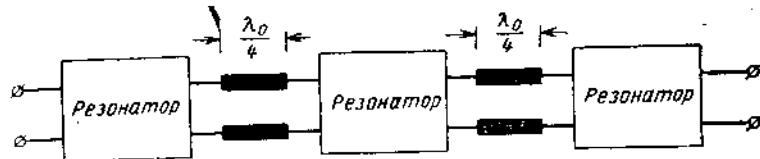


Рис. 8.2. Схематическое изображение фильтра с четвертьволновыми связями.

После расчета прототипа переход к фильтру СВЧ облегчается изменением прототипной схемы и приведением ее к виду, изображеному на рис. 8.4. Эквивалентность схем, изображенных на

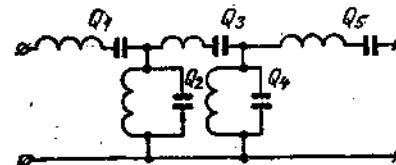


Рис. 8.3. Схема прототипа.

рис. 8.3 и 8.4, сохраняется в полосе до 20% [3]; причиной ограничений является частотная чувствительность четвертьволновых отрезков линий.

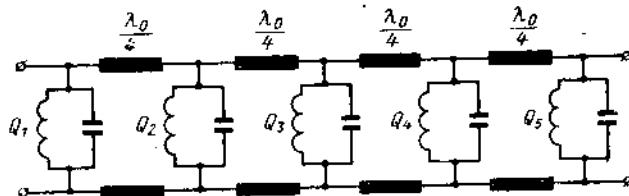


Рис. 8.4. Видоизмененная схема прототипа.

В табл. 8.1 приведены формулы для расчета нагруженной добротности, сопротивления и функции рабочего затухания для применяемых в прототипе и производных от него схемах контуров.

Таблица 8.1

Формулы для расчета нагруженной добротности, сопротивления и функции рабочего затухания контуров

№ п/п	Схема	Сопротивление контура Z	Добротность нагруженного контура Q	Функция рабочего затухания L
1		$j 2\rho Q \eta$	$\frac{1}{2\rho} \omega_0 L$	$1 + Q^2 \eta^2$
2		$\frac{1}{2} - j\frac{\rho}{Q \eta}$	$\frac{\rho}{2} - \frac{1}{\omega_0 L}$	$1 + Q^2 \eta^2$
3		$\frac{2\rho}{jQ \eta}$	$2\rho \frac{1}{\omega_0 L}$	$1 + \frac{1}{Q^2 \eta^2}$
4		$j \frac{1}{2} \rho Q \eta$	$\frac{2}{\rho} \omega_0 L$	$1 + \frac{1}{Q^2 \eta^2}$

Обозначения к табл. 8.1:

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

8.2. СХЕМА СИНТЕЗА ПРОТОТИПА

Ниже дана последовательность операций синтеза прототипа. Прежде всего необходимо задать шесть величин, характеризующих требуемые электрические свойства фильтра (рис. 8.5):

границные частоты полосы пропускания f_p и f_{-p} ;

границные частоты заграждения f_3 и f_{-3} ;

максимальное затухание в полосе пропускания b_p (или допуск на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$);
минимальное затухание в полосе заграждения b_3 .

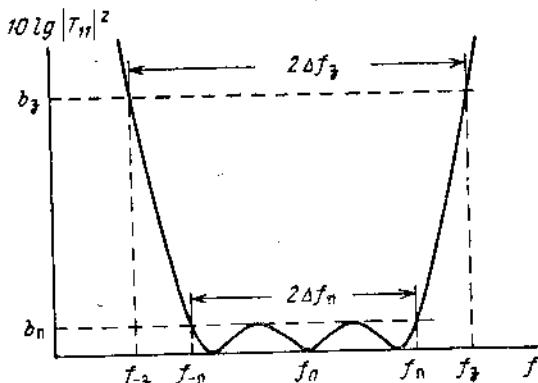


Рис. 8.5. Частотная характеристика прототипа.

Первый этап синтеза состоит в выборе конкретной формы функции рабочего затухания. Наиболее распространены два вида этой зависимости:
чебышевская

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 T_n^2 \left(\frac{\eta}{S} \right)^{2n} \quad (8.1)$$

и максимально плоская

$$|T_{11}|^2 = 1 + Q_{\Phi}^{2n} \eta^{2n} = 1 + h^2 \left(\frac{\eta}{S} \right)^{2n}. \quad (8.2)$$

Здесь T_n — полином Чебышева 1-го рода n -го порядка;

n — число звеньев фильтра;

$\eta = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$ — частотная переменная;

h — амплитудный множитель;

$$h = \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}}; \quad (8.4)$$

$$S = \tau_{\text{п}} = \frac{f_u}{f_0} = \frac{f_0}{f_{\text{п}}}; \quad (8.5)$$

S — масштабный множитель;
 $\eta/S = 1$ при $\eta = \tau_{\text{п}}$;

$$Q_{\Phi} = \frac{\sqrt[n]{h}}{S}; \quad (8.6)$$

Q_{Φ} — добротность (по уровню 3 дБ) фильтра с максимальной плоской характеристикой.

Определения (8.1) и (8.2) совместно с заданными техническими условиями ($f_u, f_{\text{п}}, f_{z_1}, f_{z_2}, b_u$ и b_z) позволяют найти требуемое число звеньев n . Полагая в (8.1) и (8.2) $\eta = \tau_{\text{п}}$; $|T_{11}|^2 = L_n$, а затем $\eta = \tau_{\text{п}}$; $|T_{11}|^2 = L_3$ и используя полученные два уравнения для определения n , получаем

$$n = \frac{\arg \operatorname{ch} \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\arg \operatorname{ch} \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}} \cdot \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}}} \quad (8.7)$$

и для фильтра с максимально-плоской характеристикой

$$n = \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\lg \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}}} \quad (8.8)$$

При этом

$$L_n = \operatorname{ant} \lg \left(\frac{b_u}{10} \right), \quad L_3 = \operatorname{ant} \lg \left(\frac{b_z}{10} \right),$$

где b_u и b_z даны в дБ

и

$$|T|_{\max} = \sqrt{\frac{L_n - 1}{L_3}}.$$

Второй этап синтеза заключается в определении коэффициента передачи T_{11} по заданному в виде функции $1 + \{A(\eta)\}^2$ квадрату его модуля. Для этой цели необходимо найти корни уравнения

$$1 + \{A(\eta)\}^2 = 0$$

и представить функцию рабочего затухания в виде произведения двух комплексно-сопряженных множителей:

$$|T_{11}|^2 = T_{11} T_{11}^* = a^2 ((\eta - \tau_1)(\eta - \tau_2) \dots (\eta - \tau_n)) \times \\ \times ((\eta - \tau_1^*)(\eta - \tau_2^*) \dots (\eta - \tau_n^*)). \quad (8.9)$$

Здесь $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ — корни, расположенные в верхней полуплоскости комплексной переменной η ;
 $\tau_1^*, \tau_2^*, \dots, \tau_n^*$ — сопряженные корни.

В качестве T_{11} выбираем тот из сомножителей в (8.9), корни которого лежат в верхней полуплоскости, т. е. соответствуют устойчивому полиному.

Третий этап синтеза состоит в определении сопротивления холостого хода¹ Z_{xx} фильтра по найденному значению T_{11} . Если в заданной функции рабочего затухания $|T_{11}|^2 = 1 + \{A(\eta)\}^2$ полином $A(\eta)$ — нечетный, то фильтр будет симметричным; его сопротивление холостого хода следует определять по формуле (1.132). Если же $A(\eta)$ — четный полином, то соответствующий фильтр асимметричный и сопротивление холостого хода вычисляется по формуле (1.133). В последнем случае в схеме может понадобиться идеальный

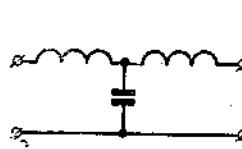


Рис. 8.6. Фильтр нижних частот.

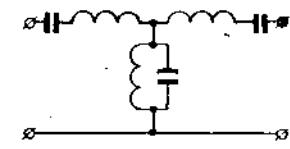


Рис. 8.7. Полосно-пропускающий фильтр.

трансформатор, обеспечивающий $|T_{11}(0)|^2 \neq 1$; это характерно для чебышевских фильтров с четным числом звеньев. Легко показать, что числовое значение коэффициента трансформации определяется из соотношения

$$N_{\text{tp}}^2 = \frac{T_{11}(0) - \sqrt{|T_{11}(0)|^2 - 1}}{T_{11}(0) + \sqrt{|T_{11}(0)|^2 - 1}}. \quad (8.10)$$

Четвертый этап синтеза, заключается в определении числовых значений ветвей лестничной схемы. С этой целью найденное значение сопротивления холостого хода $\frac{Z_{xx}}{\rho}$ разлагается в цепную дробь:

$$\frac{Z_{xx}}{\rho} = k_1 \rho + \frac{1}{k_2 \rho + \frac{1}{k_3 \rho + \dots + \frac{1}{k_n \rho}}} \quad (8.11)$$

и коэффициенты k_1, k_2, \dots, k_n отождествляются с элементами лестничной схемы. Если рассчитывается фильтр низких частот, то $\rho = j\omega$ и k_1, k_2, \dots, k_n соответствуют индуктивностям или емкостям

¹ Вообще говоря, можно определить любое из четырех сопротивлений Z_{zz} , Z_{xx} , Z'_{zz} , Z'_{xx} (см. гл. 1).

Таблица 8.2

Чебышевские фильтры с нечетным числом звеньев $n = 3 \div 19$

$ \Gamma _{\max}$	$n = 3$		$n = 5$		$n = 7$			
	$Q_1 S = Q_2 S$	$Q_2 S$	$Q_1 S = Q_3 S$	$Q_3 S = Q_4 S$	$Q_4 S$	$Q_1 S = Q_5 S$	$Q_5 S = Q_6 S$	$Q_6 S$
0,02	0,226	0,392	0,292	0,585	0,685	0,315	0,641	0,790
0,04	0,293	0,466	0,357	0,640	0,765	0,378	0,686	0,855
0,06	0,344	0,508	0,407	0,666	0,820	0,426	0,706	0,900
0,08	0,388	0,534	0,449	0,680	0,863	0,468	0,715	0,937
0,10	0,427	0,552	0,487	0,686	0,902	0,505	0,718	0,971
0,12	0,463	0,564	0,522	0,688	0,937	0,540	0,718	1,002
0,14	0,498	0,571	0,556	0,687	0,970	0,573	0,714	1,032
0,16	0,531	0,575	0,588	0,684	1,002	0,605	0,709	1,062
0,18	0,563	0,577	0,620	0,679	1,033	0,637	0,702	1,091
0,20	0,595	0,577	0,651	0,673	1,064	0,667	0,694	1,120
0,22	0,626	0,575	0,682	0,666	1,095	0,698	0,686	1,149
0,24	0,657	0,573	0,713	0,658	1,126	0,729	0,676	1,179
0,26	0,688	0,569	0,743	0,649	1,157	0,759	0,666	1,209
0,28	0,719	0,564	0,774	0,640	1,189	0,790	0,656	1,240
0,30	0,751	0,558	0,806	0,630	1,221	0,821	0,646	1,271

элементов лестничной схемы (рис. 8.6). Если же приводится синтез полосового пропускающего фильтра, то $p = j \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$ и k_1, k_2, \dots, k_n соответствуют добротностям параллельных и последовательных контуров в ветвях лестничной схемы (рис. 8.7). Переход от фильтра нижних частот к полосовому пропускающему, заграждающему либо фильтру верхних частот называют «преобразованием частоты» [2]. Оно основано на том, что при замене, например, схемы, изображенной на рис. 8.6, схемой рис. 8.7, все закономерности, свойственные схеме (в том числе и условия физической реализуемости) сохраняются, если заменить ω на η .

8.3. ТЕХНИКА РАСЧЕТОВ ПРОТОТИПА

Вследствие громоздкости и значительной вероятности ошибок описанный метод в первоначальном своем виде неудобен при расчетах. Известны два способа преодоления этих трудностей. В первом способе выявляются общие закономерности в распределении добротностей контуров лестничной схемы; эти закономерности ис следуются при разложении Z_{xx} в цепную дробь и затем (по индукции) обобщаются. Наиболее простой закон распределения добротностей удалось обнаружить в фильтре с максимально плоской характеристикой [4]:

$$Q_m = Q_\phi \sin \frac{2m-1}{2n} \pi, \quad (8.12)$$

где Q_m — требуемая добротность m -го звена;

Q_ϕ — заданная добротность всего фильтра;

n — число звеньев фильтра.

Второй способ преодоления расчетных трудностей заключается в полной каталогизации всех трудосмых процессов расчета; это путь принят ниже при описании инженерной методики расчета чебышевских LC -фильтров.

Ниже приводятся таблицы и графики, необходимые для расчета фильтра¹. Число звеньев рассчитывается по формуле (8.7) либо (8.8) и округляется до ближайшего большего целого числа.

В табл. 8.2 даны произведения ($Q_i S$) нагруженной добротности звеньев фильтра на масштабный множитель S для чебышевских фильтров с нечетным числом звеньев $n = 3 \div 19$.

При четном числе звеньев реализация на СВЧ чебышевского фильтра с четвертьвольновыми связями встречает трудности; здесь такие фильтры не рассматриваются.

Порядок расчета: по заданным требованиям ($f_u, f_{-u}, f_s, F_u, b_u, b_s$) определяются параметры η_u, η_s и S .

Выбирается тип частотной характеристики рабочего затухания (чебышевская либо максимально плоская) и по формуле (8.7) либо (8.8) определяется число звеньев (n) фильтра. Число звеньев (n) фильтра можно также определять по графикам² рис. 8.16 для фильтра

¹ При этом $Q_i S = \frac{1}{2} g_i$ (см. табл. 9.5—9.6).

² Графики составлены Розановой Л. С.

$ \Gamma _{\max}$	$n = 9$				$n = 11$			
	$Q_1 S = Q_2 S$	$Q_2 S = Q_3 S$	$Q_3 S = Q_4 S$	$Q_4 S$	$Q_1 S = Q_5 S$	$Q_5 S = Q_6 S$	$Q_6 S = Q_7 S$	$Q_7 S = Q_8 S$
0,02	0,325	0,664	0,826	0,842	0,889	0,330	0,675	0,843
0,04	0,387	0,705	0,885	0,856	0,938	0,392	0,714	0,898
0,06	0,435	0,722	0,926	0,855	0,973	0,439	0,730	0,938
0,08	0,476	0,729	0,961	0,848	1,004	0,480	0,736	0,972
0,10	0,513	0,731	0,993	0,839	1,033	0,517	0,737	1,002
0,12	0,547	0,729	1,023	0,827	1,061	0,551	0,734	1,032
0,14	0,580	0,724	1,052	0,815	1,088	0,584	0,730	1,060
0,16	0,612	0,718	1,080	0,802	1,115	0,616	0,723	1,089
0,18	0,644	0,711	1,109	0,789	1,142	0,647	0,715	1,117
0,20	0,674	0,702	1,137	0,775	1,170	0,678	0,706	1,145
0,22	0,705	0,693	1,166	0,762	1,197	0,709	0,697	1,173
0,24	0,736	0,683	1,195	0,747	1,226	0,739	0,687	1,202
0,26	0,766	0,673	1,225	0,733	1,255	0,770	0,676	1,232
0,28	0,797	0,662	1,255	0,719	1,284	0,800	0,666	1,262
0,30	0,828	0,651	1,286	0,705	1,315	0,831	0,654	1,293

Продолжение табл. 8.2

n = 13

$ \Gamma _{\text{макс}}$	$Q_1S = Q_{14}S$	$Q_2S = Q_{12}S$	$Q_3S = Q_{11}S$	$Q_4S = Q_{10}S$	$Q_5S = Q_9S$	$Q_6S = Q_8S$	$Q_7S = Q_7S$
0,02	0,333	0,682	0,852	0,875	0,937	0,912	0,953
0,04	0,395	0,719	0,905	0,881	0,976	0,910	0,989
0,06	0,442	0,734	0,944	0,876	1,007	0,900	1,018
0,08	0,482	0,740	0,977	0,866	1,034	0,887	1,044
0,10	0,519	0,741	1,008	0,855	1,060	0,873	1,070
0,12	0,553	0,738	1,037	0,842	1,086	0,859	1,095
0,14	0,586	0,732	1,065	0,828	1,112	0,844	1,120
0,16	0,618	0,726	1,093	0,814	1,138	0,828	1,145
0,18	0,649	0,718	1,121	0,800	1,164	0,813	1,171
0,20	0,680	0,709	1,149	0,785	1,191	0,797	1,198
0,22	0,711	0,699	1,177	0,771	1,218	0,782	1,224
0,24	0,741	0,689	1,206	0,756	1,245	0,766	1,252
0,26	0,772	0,678	1,236	0,741	1,274	0,751	1,280
0,28	0,802	0,667	1,266	0,727	1,303	0,736	1,309
0,30	0,833	0,656	1,296	0,712	1,333	0,720	1,339

Продолжение табл. 8.2

n = 17

$ \Gamma _{\text{макс}}$	$Q_1S = Q_{14}S$	$Q_2S = Q_{12}S$	$Q_3S = Q_{11}S$	$Q_4S = Q_{10}S$	$Q_5S = Q_9S$	$Q_6S = Q_{14}S$	$Q_7S = Q_{12}S$	$Q_8S = Q_{11}S$	$Q_9S = Q_{10}S$	$Q_{10}S$
0,02	0,336	0,689	0,861	0,885	0,951	0,928	0,974	0,940	0,980	
0,04	0,397	0,725	0,913	0,889	0,987	0,922	1,005	0,931	1,010	
0,06	0,444	0,739	0,951	0,882	1,016	0,910	1,032	0,918	1,036	
0,08	0,485	0,744	0,983	0,872	1,042	0,896	1,057	0,902	1,060	
0,10	0,521	0,744	1,013	0,860	1,068	0,881	1,081	0,886	1,084	
0,12	0,556	0,741	1,042	0,846	1,093	0,865	1,105	0,870	1,108	
0,14	0,589	0,735	1,070	0,832	1,118	0,849	1,130	0,854	1,133	
0,16	0,620	0,728	1,097	0,818	1,144	0,834	1,155	0,838	1,158	
0,18	0,651	0,720	1,125	0,803	1,170	0,818	1,180	0,822	1,183	
0,20	0,682	0,711	1,153	0,789	1,196	0,802	1,206	0,805	1,209	
0,22	0,713	0,701	1,181	0,774	1,223	0,786	1,233	0,789	1,235	
0,24	0,743	0,691	1,210	0,759	1,251	0,770	1,260	0,773	1,262	
0,26	0,774	0,680	1,239	0,744	1,279	0,755	1,288	0,757	1,290	
0,28	0,804	0,669	1,269	0,729	1,308	0,739	1,317	0,742	1,319	
0,30	0,835	0,658	1,300	0,714	1,338	0,724	1,347	0,726	1,349	

n = 15

n = 19

$ \Gamma _{\text{макс}}$	$Q_1S = Q_{14}S$	$Q_2S = Q_{12}S$	$Q_3S = Q_{11}S$	$Q_4S = Q_{10}S$	$Q_5S = Q_9S$	$Q_6S = Q_{14}S$	$Q_7S = Q_{12}S$	$Q_8S = Q_{11}S$	$Q_9S = Q_{10}S$	$Q_{10}S$
0,02	0,337	0,691	0,864	0,888	0,954	0,932	0,979	0,946	0,987	0,949
0,04	0,398	0,726	0,915	0,891	0,988	0,925	1,009	0,935	1,015	0,938
0,06	0,445	0,740	0,952	0,884	1,018	0,912	1,035	0,921	1,040	0,923
0,08	0,485	0,745	0,985	0,873	1,044	0,898	1,059	0,905	1,064	0,907
0,10	0,522	0,745	1,014	0,861	1,070	0,882	1,084	0,889	1,088	0,890
0,12	0,556	0,742	1,043	0,847	1,095	0,867	1,108	0,872	1,112	0,874
0,14	0,589	0,736	1,071	0,833	1,120	0,851	1,132	0,856	1,136	0,857
0,16	0,621	0,729	1,099	0,819	1,145	0,835	1,157	0,840	1,161	0,841
0,18	0,652	0,721	1,126	0,804	1,171	0,819	1,182	0,823	1,186	0,824
0,20	0,683	0,712	1,154	0,789	1,197	0,803	1,208	0,807	1,211	0,808
0,22	0,713	0,702	1,182	0,775	1,224	0,787	1,235	0,791	1,238	0,792
0,24	0,744	0,691	1,211	0,760	1,252	0,771	1,262	0,775	1,265	0,775
0,26	0,774	0,681	1,240	0,745	1,180	0,755	1,290	0,759	1,293	0,759
0,28	0,805	0,670	1,270	0,730	1,309	0,740	1,319	0,743	1,322	0,744
0,30	0,836	0,658	1,301	0,715	1,339	0,724	1,348	0,727	1,351	0,728

Таблица 8.2а

Зависимость затухания (b_n) и КБВ от модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$

$ \Gamma $	$b_n, \text{дБ}$	КБВ	$ \Gamma $	$b_n, \text{дБ}$	КБВ	$ \Gamma $	$b_n, \text{дБ}$	КБВ
0,00	0,000	1,000	0,34	0,533	0,493	0,68	2,695	0,191
0,01	0,000	0,980	0,35	0,568	0,482	0,69	2,808	0,183
0,02	0,002	0,961	0,36	0,603	0,471	0,70	2,924	0,177
0,03	0,004	0,941	0,37	0,639	0,460	0,71	3,046	0,170
0,04	0,007	0,923	0,38	0,679	0,449	0,72	3,173	0,163
0,05	0,011	0,905	0,39	0,717	0,439	0,73	3,306	0,156
0,06	0,016	0,887	0,40	0,757	0,429	0,74	3,445	0,149
0,07	0,021	0,869	0,41	0,799	0,418	0,75	3,590	0,143
0,08	0,028	0,852	0,42	0,843	0,408	0,76	3,743	0,136
0,09	0,035	0,835	0,43	0,888	0,399	0,77	3,903	0,130
0,10	0,043	0,818	0,44	0,934	0,389	0,78	4,072	0,124
0,11	0,053	0,802	0,45	0,983	0,379	0,79	4,249	0,117
0,12	0,063	0,786	0,46	1,032	0,370	0,80	4,437	0,111
0,13	0,074	0,770	0,47	1,084	0,361	0,81	4,636	0,105
0,14	0,086	0,754	0,48	1,137	0,351	0,82	4,847	0,099
0,15	0,099	0,739	0,49	1,193	0,342	0,83	5,071	0,093
0,16	0,113	0,724	0,50	1,249	0,333	0,84	5,311	0,087
0,17	0,128	0,709	0,51	1,308	0,325	0,85	5,567	0,081
0,18	0,143	0,695	0,52	1,369	0,316	0,86	5,844	0,075
0,19	0,159	0,681	0,53	1,432	0,307	0,87	6,142	0,070
0,20	0,177	0,667	0,54	1,497	0,299	0,88	6,467	0,064
0,21	0,196	0,653	0,55	1,565	0,290	0,89	6,821	0,058
0,22	0,216	0,639	0,56	1,634	0,282	0,90	7,213	0,053
0,23	0,236	0,626	0,57	1,706	0,274	0,91	7,647	0,047
0,24	0,258	0,613	0,58	1,781	0,266	0,92	8,136	0,042
0,25	0,280	0,600	0,59	1,858	0,258	0,93	8,693	0,036
0,26	0,304	0,587	0,60	1,938	0,250	0,94	9,341	0,031
0,27	0,329	0,574	0,61	2,021	0,242	0,95	10,110	0,026
0,28	0,355	0,562	0,62	2,110	0,235	0,96	11,057	0,020
0,29	0,381	0,551	0,63	2,196	0,227	0,97	12,284	0,015
0,30	0,410	0,539	0,64	2,289	0,220	0,98	14,023	0,010
0,31	0,439	0,527	0,65	2,385	0,212	0,99	17,011	0,005
0,32	0,469	0,515	0,66	2,484	0,205	1,00	∞	0,000
0,33	0,501	0,504	0,67	2,588	0,198	—	—	—

тров с максимально плоской характеристикой и рис. 8.17 для фильтров с чебышевской характеристикой. Если выбран фильтр с максимально плоской характеристикой, то добротности звеньев определяются по формуле (8.12). В случае чебышевского фильтра добротности звеньев дает табл. 8.2.

Использование чебышевской характеристики обеспечивает экономное расходование звеньев, в случае же максимально плоской характеристики имеется некоторый выигрыш в линейности фазо-частотных характеристик фильтра.

Связь между b_n , КБВ и $|\Gamma|$ дана в табл. 8.2а.

Пример. Задано

$$\frac{f_u}{3095} \left| \frac{f_{-u}}{2905} \right| \left| \frac{f_3}{3107} \right| \left| \frac{f_{-3}}{2893} \right| \left| \frac{|\Gamma|_{\max}}{0,2} \right| \left| \frac{b_3}{15 \text{ дБ}} \right|$$

Тип характеристики — чебышевская.

Решение

1. Определяем число звеньев фильтра:

$$\eta_u = \frac{f_u}{f_0} - \frac{f_0}{f_u} = \frac{3095}{3000} - \frac{3000}{3095} \approx 0,06,$$

$$\eta_3 = \frac{f_3}{f_0} - \frac{f_0}{f_3} = \frac{3107}{3000} - \frac{3000}{3107} \approx 0,07,$$

$$\eta_3/\eta_u = \frac{0,07}{0,06} = 1,17,$$

$$L_n = \frac{1}{1 - |\Gamma|_{\max}^2} = 1,04;$$

$$L_3 = \operatorname{ant} \lg \frac{b_3}{10} = \operatorname{ant} \lg \frac{15}{10} = 31,6,$$

$$n = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\operatorname{ar ch} \frac{\eta_3}{\eta_u}} = \frac{\operatorname{ar ch} 24}{\operatorname{ar ch} 1,17} = 6,3.$$

Округляем до $n = 7$.

2. Определяем нормированную добротность каждого звена фильтра. По табл. 8.2 при $|\Gamma|_{\max} = 0,2$ находим:

$$Q_1 S = Q_7 S = 0,667,$$

$$Q_2 S = Q_6 S = 0,694,$$

$$Q_3 S = Q_5 S = 1,120,$$

$$Q_4 S = 0,758.$$

3. Находим абсолютные значения добротностей:

$$S = \eta_u = 0,06,$$

$$Q_1 = Q_7 = \frac{0,667}{0,06} = 11,1,$$

$$Q_2 = Q_6 = \frac{0,694}{0,06} = 11,6,$$

$$Q_3 = Q_5 = \frac{1,12}{0,06} = 18,7,$$

$$Q_4 = \frac{0,758}{0,06} = 12,6.$$

Таким образом, в чебышевском фильтре в отличие от максимально плоского закона распределения Q не является монотонно спадающей (от центра к краям) функцией.

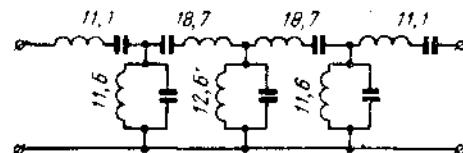


Рис. 8.8. Схема фильтра, соответствующая примеру расчета.

Лестничная схема, соответствующая найденным значениям добротностей ветвей, изображена на рис. 8.8.

8.4. РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА (ППФ)

Схема фильтра, которую необходимо реализовать на СВЧ, изображена на рис. 8.4.

Если система работает при малых мощностях, то наиболее простым методом реализации на СВЧ лестничной схемы вида, изображенного на рис. 8.4, является, например, установка в волноводе резонансных диафрагм на расстоянии $\Delta_0/4$ друг от друга. Каждая такая диафрагма эквивалентна резонансной ветви лестничной схемы, а четвертьволновые расстояния между диафрагмами осуществляют преобразование параллельных ветвей в последовательные. Ввиду того что отрезки линий обладают некоторой частотной избирательностью, указанный пересчет выполняется точно лишь на резонансной длине волн [4]. На других волнах диапазона электрическая длина соединительного отрезка изменяется, что эквивалентно изменению нагруженной добротности контуров [4]. Контуры, расположенные на краях цепочки, получают приращение добротности $\Delta_1 Q = \pi/8$, а контуры внутри цепочки увеличивают свою добротность на удвоенную величину $\Delta_2 Q = \pi/4$. Если передающая линия обладает дисперсией, то приращение добротности контуров за счет частотной чувствительности соединительных линий увеличивается еще на $(\Lambda_0/\lambda_0)^2$ раз, т. е.

$$\Delta_1 Q = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\Lambda_0}{\lambda_0} \right)^2; \quad \Delta_2 Q = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\Lambda_0}{\lambda_0} \right)^2. \quad (8.13)$$

В ППФ с четвертьволновыми связями можно применять любые другие типы контуров, подходящих к выбранному типу передающей линии. Некоторые конструкции контуров фильтра изображены на рис. 8.9.

В мощных СВЧ устройствах системы, изображенные на рис. 8.9, *a*, *b*, непригодны, поскольку их электрическая прочность мала. В этом случае реализуется параллельная ветвь лестничной схемы в виде объема, заключенного между решетками индуктивных штырей (рис. 8.9, *c*). Расстояние между контурами такого типа в отличие от случая резонансных диафрагм будет несколько меньше четвертьволнового [4].

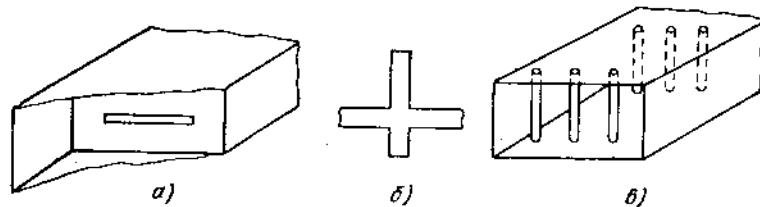


Рис. 8.9. Некоторые типы резонаторов для ППФ:
а — резонансная диафрагма в волноводе; б — шлейф в полосковой линии;
в — решетки индуктивных штырей в волноводе.

Порядок расчета такой системы следующий: после того как найдены требуемые величины нагруженной добротности Q_m контуров, определяется вспомогательная величина Q^0 (начальная добротность), имеющая смысл нагруженной добротности контура без учета дисперсии в волноводе и частотной чувствительности соединительных линий:

$$\left. \begin{aligned} Q_m^0 &= Q_m \left(\frac{\lambda_0}{\Lambda_0} \right)^2 - \frac{\pi}{4} \text{ (средние контуры цепочки);} \\ Q_m^0 &= Q_m \left(\frac{\lambda_0}{\Lambda_0} \right)^2 - \frac{\pi}{8} \text{ (краевые контуры цепочки).} \end{aligned} \right\} \quad (8.14)$$

Индуктивная проводимость штырей, необходимая для создания добротности, определяется по формуле [3]

$$Q^0 = \frac{1}{4} \left\{ \sqrt{B_0^4 + 4B_0^2} \left[\operatorname{arctg} \frac{2}{B_0} + (k-1)\pi \right] + \frac{2B_0^2}{\sqrt{B_0^2 + 4}} \right\}, \quad (8.15)$$

где B_0 — проводимость штыря при $\lambda = \lambda_0$;

k — номер резонанса (любое целое число).

При $k=1$ звенья фильтра имеют минимальную длину. Графики зависимости Q^0 от B_0 при $k=1, 2, 3$ даны на рис. 8.10, *a*, *b*, *c*, *г*.

Для увеличения электрической прочности звена при том же Q^0 нужно уменьшить реактивную проводимость, что достигается увеличением длины звена, т. е. $k=2, 3$ и т. д.

Резонансная длина звена определяется по формуле

$$l_v = \frac{\Lambda_0}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{2}{B_0} + (k-1)\pi \right], \quad (8.16)$$

где v — номер звена.

Длина соединительных линий между звенями

$$l_{v(v+1)} = (2m-1) \frac{\Lambda_0}{4} - k \frac{\Lambda_0}{2} + \frac{l_v + l_{v+1}}{2}, \quad (8.17)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ — ряд целых чисел, определяющих число четвертей длии волны, выбранных для соединительных линий.

Проводимость B_0 в волноводе реализуется в виде решетки, состоящей из нескольких индуктивных стержней.

При таком расположении стержней уменьшается интенсивность высших типов волн, возникающих в сечении неоднородности. Диаметр стержней d , соответствующий требуемой величине B_0 , можно найти по таблицам гл. 4.

Пример. Ранее была найдена лестничная схема (рис. 8.8) со следующими действующими нагруженными добротностями ветвей:

$$Q_1 = Q_7 = 11,1; \quad Q_2 = Q_8 = 11,6; \quad Q_3 = Q_5 = 18,7; \quad Q_4 = 12,6.$$

Найти эквивалент этой схемы на СВЧ.

1. Начальные добротности:

$$Q_1^0 = Q_1 \left(\frac{\lambda_0}{\Lambda_0} \right)^2 - \frac{\pi}{8} = 11,1 \sqrt{1 - \left(\frac{10}{14,4} \right)^2} - 0,39 = 5,31$$

и аналогично

$$Q_2^0 = 5,06; \quad Q_3^0 = 8,81; \quad Q_4^0 = 5,41.$$

2. По графику, изображенному на рис. 8.10, находим соответствующие проводимости индуктивных неоднородностей:

$$B_1 = -2,4; \quad B_2 = -2,2; \quad B_3 = -3,2; \quad B_4 = -2,5.$$

3. По графику, построенному по данным табл. 4.1 при $\lambda/a = 1,39$, находим относительные, а затем и абсолютные значения диаметров штырей:

$$d_1 = 0,65 \text{ мм}; \quad d_2 = 0,5 \text{ мм}; \quad d_3 = 1,3 \text{ мм}; \quad d_4 = 0,72 \text{ мм}.$$

4. Длина объемных резонаторов

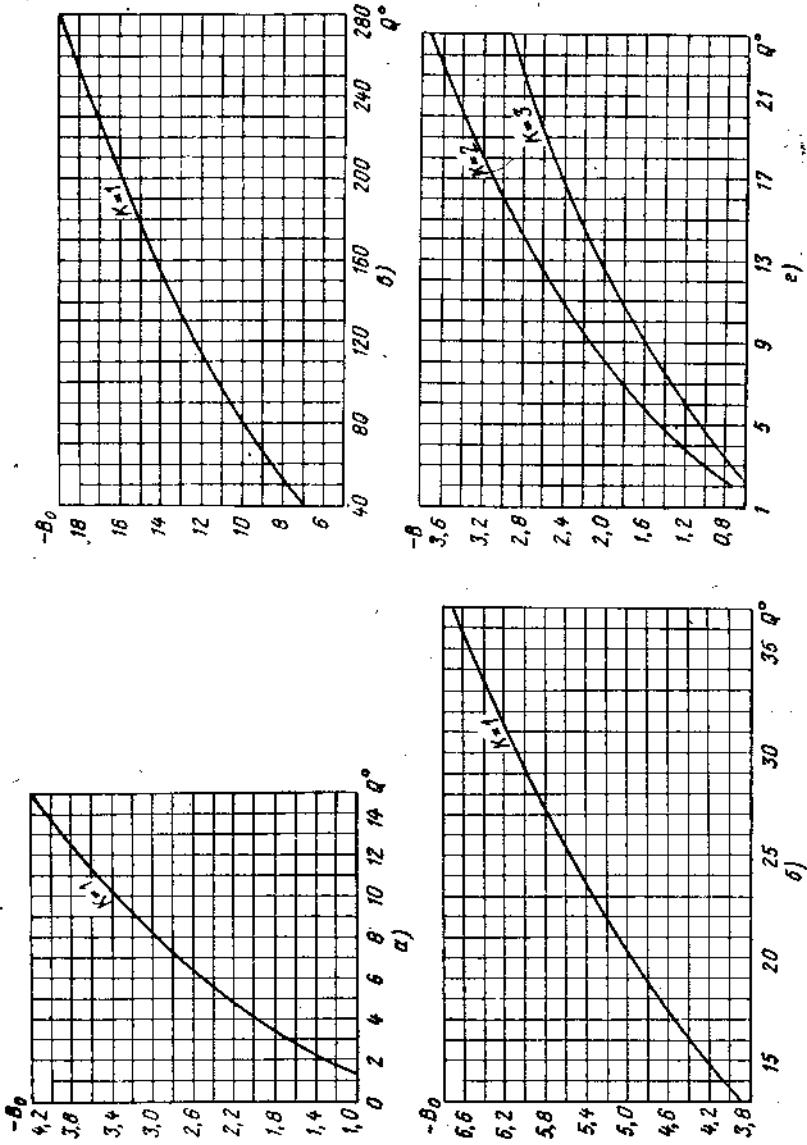
$$l_1 = \frac{\Lambda_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2}{B_1} = \frac{140}{6,28} \operatorname{arctg} \frac{2}{-2,4} = 55 \text{ мм}$$

и аналогично

$$l_2 = 54 \text{ мм}; \quad l_3 = 58 \text{ мм}; \quad l_4 = 55,5 \text{ мм}.$$

5. Расстояния между контурами

$$l_{12} = \frac{l_1 + l_2}{2} - \frac{\Lambda_0}{4} = \frac{55 + 54}{2} - \frac{140}{4} = 19,5 \text{ мм}$$



и далее

$$l_{23} = 21 \text{ мм}; \quad l_{34} = 21,65 \text{ мм}.$$

Эскиз соответствующего фильтра показан на рис. 8.11.

Погрешность описанного метода, ограничивающая его применения полосой порядка $\leq 15\%$, определяется в основном двумя факторами: приближенностью самого понятия добротности объемного резонатора и погрешностями, вносимыми четвертьволновыми связями. Если в качестве эквивалента резонансных контуров применять резонансные диафрагмы, то полоса, в которой допустимо применение метода, достигает 20% [3].

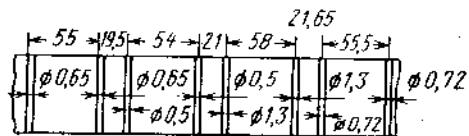


Рис. 8.11. Эскиз половины фильтра, соответствующего примеру расчета.

Потери в контурах фильтра определяются по известным величинам нагруженной и собственной добротности [см. § 4.7 и формулу (4.46)].

Применение теории полосно-пропускающих СВЧ фильтров с четвертьволновыми связями к широкополосному согласованию некоторых комплексных сопротивлений см. [6].

8.5. ФАЗО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Системы с полиномиальной частотной характеристикой рабочего затухания являются цепями минимально фазового типа и допускают однозначное определение фазо-частотной характеристики по известной амплитудной характеристике. Ниже приведены (табл. 8.3) фазо-частотные характеристики фильтров максимального плоского и чебышевского типов. Обозначения в таблице:

$$\Omega = \frac{\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}}{S} \quad \text{— обобщенная частотная переменная;}$$

$$S = \frac{f_n}{f_0} - \frac{f_0}{f_n} \quad \text{— масштабный коэффициент;}$$

f_0 — резонансная частота;

f_n — граница полосы пропускания;

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im} T_{11}(\Omega)}{\operatorname{Re} T_{11}(\Omega)} \quad \text{— фаза коэффициента передачи.}$$

Характер фазо-частотных зависимостей показан на рис. 8.12, а — з.

Таблица 8.3

Фазо-частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров $\varphi(\Omega)$, ради
1. $\varphi(\Omega)$ фильтров с максимальной плоской характеристикой рабочего затухания

$n=2$

Ω	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 2	0, 111	0, 132	0, 148	0, 158	0, 168	0, 214	0, 241	0, 258	0, 272	0, 282
0, 4	0, 222	0, 266	0, 296	0, 320	0, 340	0, 431	0, 486	0, 521	0, 549	0, 581
0, 6	0, 337	0, 405	0, 452	0, 489	0, 520	0, 654	0, 739	0, 795	0, 838	0, 974
0, 8	0, 456	0, 549	0, 614	0, 666	0, 710	0, 886	1, 007	1, 088	1, 150	1, 202
1, 0	0, 578	0, 700	0, 784	0, 852	0, 908	1, 133	1, 296	1, 406	1, 492	1, 562
1, 2	0, 704	0, 855	0, 959	1, 042	1, 110	1, 398	1, 608	1, 748	1, 857	1, 946
1, 4	0, 834	1, 014	1, 135	1, 230	1, 306	1, 682	1, 936	2, 100	2, 223	2, 320
1, 6	0, 968	1, 172	1, 306	1, 410	1, 491	1, 974	2, 258	2, 431	2, 555	2, 650
1, 8	1, 100	1, 326	1, 469	1, 575	1, 658	2, 260	2, 552	2, 718	2, 834	2, 920
2, 0	1, 232	1, 471	1, 618	1, 723	1, 804	2, 522	2, 802	2, 954	3, 058	3, 133

n=4

Ω	$b_{\Pi}, \partial\delta$					$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 2	0, 327	0, 358	0, 376	0, 391	0, 403	0, 446	0, 478	0, 498	0, 514	0, 526
0, 4	0, 659	0, 721	0, 760	0, 790	0, 814	0, 898	0, 964	1, 006	1, 038	1, 064
0, 6	1, 001	1, 098	1, 160	1, 208	1, 246	1, 365	1, 470	1, 536	1, 586	1, 627
0, 8	1, 360	1, 390	1, 460	1, 660	1, 718	1, 860	2, 012	2, 110	2, 184	2, 245
1, 0	1, 751	1, 944	2, 072	2, 172	2, 253	2, 405	2, 623	2, 765	2, 874	2, 964
1, 2	2, 185	2, 444	2, 613	2, 742	2, 845	3, 032	3, 334	3, 527	3, 672	3, 787
1, 4	2, 662	2, 974	3, 166	3, 304	3, 410	3, 732	4, 080	4, 283	4, 426	4, 532
1, 6	3, 140	3, 463	3, 644	3, 769	3, 862	4, 386	4, 702	4, 872	4, 987	5, 072
1, 8	3, 568	3, 859	4, 014	4, 020	4, 197	4, 894	5, 153	5, 290	5, 384	5, 452
2, 0	3, 912	4, 162	4, 293	4, 382	4, 448	5, 269	5, 482	5, 597	5, 674	5, 733

Ω	$b_{\Pi}, \partial\delta$					$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 2	0, 567	0, 600	0, 622	0, 638	0, 650	1, 2	3, 924	4, 263	4, 476	4, 632
0, 4	1, 142	1, 212	1, 256	1, 289	1, 316	1, 4	4, 859	5, 219	5, 420	5, 558
0, 6	1, 738	1, 950	1, 920	1, 972	2, 014	1, 6	5, 640	6, 637	6, 084	4, 756
0, 8	2, 374	2, 536	2, 639	2, 717	2, 780	1, 8	6, 278	6, 417	6, 540	5, 662
1, 0	3, 082	3, 320	3, 474	3, 592	3, 689	2, 0	6, 582	6, 772	6, 875	6, 689

Ω	$b_{\Pi}, \partial\delta$					$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 2	0, 291	0, 250	0, 269	0, 282	0, 291	1, 2	0, 878	1, 181	1, 332	1, 526
0, 4	0, 429	0, 446	0, 400	0, 000	0, 000	0, 75	0, 572	0, 679	0, 748	0, 844
0, 6	0, 659	0, 042	0, 088	0, 091	0, 094	0, 80	0, 617	0, 731	0, 808	0, 916
0, 8	0, 882	0, 081	0, 122	0, 132	0, 138	0, 90	0, 659	0, 786	0, 872	0, 991
1, 0	1, 107	0, 107	0, 122	0, 132	0, 143	0, 90	0, 706	0, 842	0, 935	1, 007
1, 2	1, 44	0, 164	0, 175	0, 185	0, 191	0, 95	0, 753	0, 900	1, 001	1, 079
1, 4	1, 80	0, 207	0, 222	0, 233	0, 242	1, 00	0, 798	0, 957	1, 067	1, 151
1, 6	2, 17	0, 217	0, 250	0, 269	0, 282	1, 2	0, 878	1, 181	1, 332	1, 526
1, 8	2, 55	0, 255	0, 293	0, 316	0, 331	1, 4	1, 184	1, 424	1, 581	1, 789
2, 0	2, 92	0, 292	0, 337	0, 365	0, 383	1, 6	1, 375	1, 605	1, 797	1, 911
2, 2	3, 31	0, 331	0, 383	0, 416	0, 438	1, 8	1, 553	1, 820	1, 995	2, 081
2, 4	3, 69	0, 370	0, 429	0, 466	0, 492	2, 0	1, 714	1, 973	2, 118	2, 215
2, 6	4, 09	0, 409	0, 476	0, 520	0, 550	3, 0	2, 245	2, 426	2, 558	2, 622
2, 8	4, 49	0, 449	0, 524	0, 573	0, 608	4, 0	2, 499	2, 627	2, 692	2, 735
3, 0	4, 89	0, 490	0, 574	0, 631	0, 670	5, 0	2, 641	2, 739	2, 789	2, 847
3, 2	5, 29	0, 531	0, 625	0, 677	0, 733	0, 772	0, 772	0, 772	0, 772	0, 772

2. $\varphi(\Omega)$ фильтров с чебышевской характеристикой рабочего загухания
П р о д о л ж е н и е т а б л . 8.3
 $n=2$

Ω	$b_{\Pi}, \partial\delta$					$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 0	0, 000	0, 042	0, 088	0, 091	0, 094	0, 000	0, 046	0, 080	0, 085	0, 091
0, 05	0, 037	0, 072	0, 107	0, 122	0, 132	0, 091	0, 138	0, 143	0, 148	0, 153
0, 10	0, 072	0, 107	0, 144	0, 164	0, 175	0, 138	0, 185	0, 191	0, 196	0, 201
0, 15	0, 107	0, 144	0, 182	0, 207	0, 222	0, 143	0, 191	0, 207	0, 223	0, 238
0, 20	0, 144	0, 182	0, 222	0, 250	0, 269	0, 188	0, 242	0, 269	0, 291	0, 316
0, 25	0, 180	0, 217	0, 255	0, 293	0, 316	0, 221	0, 275	0, 304	0, 331	0, 355
0, 30	0, 217	0, 255	0, 292	0, 337	0, 365	0, 231	0, 285	0, 314	0, 345	0, 375
0, 35	0, 255	0, 292	0, 331	0, 365	0, 383	0, 241	0, 295	0, 324	0, 353	0, 383
0, 40	0, 292	0, 331	0, 370	0, 409	0, 449	0, 251	0, 305	0, 334	0, 363	0, 393
0, 45	0, 331	0, 370	0, 409	0, 449	0, 490	0, 261	0, 315	0, 344	0, 373	0, 403
0, 50	0, 370	0, 409	0, 449	0, 490	0, 520	0, 271	0, 325	0, 354	0, 383	0, 413
0, 55	0, 409	0, 449	0, 488	0, 520	0, 550	0, 281	0, 335	0, 364	0, 393	0, 423
0, 60	0, 449	0, 488	0, 524	0, 573	0, 608	0, 291	0, 345	0, 374	0, 403	0, 433
0, 65	0, 490	0, 484	0, 554	0, 574	0, 631	0, 301	0, 364	0, 393	0, 422	0, 452
0, 70	0, 531	0, 554	0, 593	0, 625	0, 670	0, 311	0, 374	0, 403	0, 433	0, 463

Ω	$b_{\Pi}, \partial\delta$					$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 0	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 05	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 10	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 15	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 20	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 25	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 30	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 35	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 40	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 45	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 50	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 55	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 60	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 65	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000
0, 70	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000

ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$					ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5		0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 30	0, 485	0, 535	0, 572	0, 600	0, 623	0, 90	1, 538	1, 717	1, 837	1, 928	2, 000
0, 35	0, 564	0, 622	0, 664	0, 695	0, 721	0, 95	1, 650	1, 852	1, 993	2, 098	2, 180
0, 40	0, 646	0, 710	0, 756	0, 790	0, 818	1, 00	1, 759	1, 988	2, 143	2, 265	2, 359
0, 45	0, 728	0, 780	0, 849	0, 885	0, 915	1, 2	2, 249	2, 573	2, 774	2, 922	3, 037
0, 50	0, 808	0, 887	0, 940	0, 980	1, 011	1, 4	2, 723	3, 061	3, 248	3, 375	3, 471
0, 55	0, 891	0, 978	1, 037	1, 080	1, 111	1, 6	3, 096	3, 392	3, 545	3, 647	3, 723
0, 60	1, 075	1, 070	1, 132	1, 177	1, 212	1, 8	3, 662	3, 616	3, 737	3, 810	3, 864
0, 65	1, 059	1, 167	1, 236	1, 284	1, 323	2, 0	3, 552	3, 763	3, 870	3, 942	3, 995
0, 70	1, 144	1, 263	1, 338	1, 391	1, 433	3, 0	4, 015	4, 136	4, 198	4, 240	4, 272
0, 75	1, 240	1, 370	1, 455	1, 514	1, 561	4, 0	4, 206	4, 291	4, 336	4, 367	4, 390
0, 80	1, 335	1, 476	1, 569	1, 638	1, 691	5, 0	4, 313	4, 380	4, 416	4, 439	4, 457
0, 85	1, 438	1, 597	1, 705	1, 785	1, 844						

 $n=4$

ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$					ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5		0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 00	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 00	0, 40	1, 010	1, 143	1, 237	1, 336
0, 05	0, 122	0, 130	0, 134	0, 136	0, 136	0, 45	1, 143	1, 276	1, 384	1, 449	1, 537
0, 10	0, 245	0, 260	0, 267	0, 271	0, 273	0, 50	1, 413	1, 533	1, 605	1, 657	1, 704
0, 15	0, 368	0, 403	0, 403	0, 410	0, 414	0, 55	0, 60	1, 551	1, 692	1, 761	1, 869
0, 20	0, 493	0, 523	0, 523	0, 542	0, 552	0, 60	0, 65	1, 690	1, 832	1, 918	2, 032
0, 25	0, 619	0, 663	0, 663	0, 685	0, 700	0, 712	0, 75	1, 831	1, 995	2, 086	2, 198
0, 30	0, 748	0, 802	0, 832	0, 852	0, 869	0, 70	0, 75	1, 977	2, 145	2, 242	2, 369
0, 35	0, 878	0, 945	0, 983	1, 010	1, 031	0, 75					

ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$					ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5		0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 80	2, 130	2, 326	2, 416	2, 493	2, 554	1, 6	4, 860	5, 098	5, 223	5, 316	5, 373
0, 85	2, 291	2, 492	2, 608	2, 700	2, 761	1, 8	5, 093	5, 288	5, 400	5, 467	5, 514
0, 90	2, 464	2, 691	2, 824	2, 912	2, 993	2, 0	5, 252	5, 418	5, 507	5, 567	5, 613
0, 95	2, 651	2, 914	3, 071	3, 184	3, 289	3, 0	5, 646	5, 746	5, 800	5, 840	5, 866
1, 00	2, 859	3, 163	3, 350	3, 492	3, 614	4, 0	5, 801	5, 889	5, 928	5, 957	5, 976
1, 2	3, 787	4, 140	4, 414	4, 571	4, 689	5, 0	5, 914	5, 971	6, 002	6, 024	6, 040
1, 4	4, 476	4, 762	4, 952	5, 070	5, 145						

 $n=5$

ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$					ϱ	$b_{\Pi}, \partial\delta$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5		0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0, 00	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 000	0, 00	0, 55	1, 971	2, 077	2, 147	2, 193
0, 05	0, 178	0, 188	0, 197	0, 204	0, 210	0, 60	2, 167	2, 292	2, 370	2, 428	2, 472
0, 10	0, 451	0, 376	0, 391	0, 404	0, 416	0, 65	2, 367	2, 512	2, 604	2, 671	2, 728
0, 15	0, 530	0, 559	0, 584	0, 601	0, 616	0, 70	2, 572	2, 738	2, 888	2, 919	2, 979
0, 20	0, 706	0, 742	0, 771	0, 794	0, 812	0, 75	2, 780	2, 965	3, 076	3, 159	3, 223
0, 25	0, 881	0, 930	0, 959	0, 982	1, 002	0, 80	2, 996	3, 202	3, 318	3, 408	3, 470
0, 30	1, 056	1, 106	1, 142	1, 169	1, 189	0, 85	3, 222	3, 449	3, 574	3, 670	3, 764
0, 35	1, 232	1, 289	1, 331	1, 357	1, 381	0, 90	3, 467	3, 724	3, 865	3, 970	4, 056
0, 40	1, 411	1, 476	1, 520	1, 551	1, 573	0, 95	3, 741	4, 044	4, 210	4, 340	4, 446
0, 45	1, 593	1, 677	1, 721	1, 754	1, 778	1, 00	4, 058	4, 421	4, 636	4, 804	4, 970
0, 50	1, 780	1, 870	1, 966	1, 999	1, 2						

Приложение табл. 8.3

Ω	$b_{\text{II}}, \delta\omega$					Ω	$b_{\text{II}}, \delta\omega$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5		0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
1,4	6,182	6,453	6,593	6,662	6,753	3,0	7,242	7,334	7,383	7,419	7,444
1,6	6,521	6,729	6,839	6,918	6,990	4,0	7,404	7,474	7,508	7,535	7,551
1,8	6,729	6,897	6,993	7,060	7,112	5,0	7,497	7,551	7,579	7,600	7,634
2,0	6,874	7,023	7,103	7,160	7,202						

Ω	$b_{\text{II}}, \delta\omega$					Ω	$b_{\text{II}}, \delta\omega$				
	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5		0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,75	3,674	3,784	3,901	3,985
0,05	0,221	0,225	0,228	0,229	0,229	0,80	3,997	4,126	4,235	4,349	4,406
0,10	0,443	0,453	0,459	0,462	0,464	0,85	4,347	4,435	4,557	4,690	4,762
0,15	0,669	0,686	0,697	0,704	0,709	0,90	4,724	4,841	4,954	5,055	5,141
0,20	0,898	0,921	0,942	0,956	0,966	0,95	5,136	5,260	5,387	5,518	5,621
0,25	1,129	1,170	1,194	1,215	1,232	1,00	5,579	5,785	5,978	6,157	6,302
0,30	1,368	1,416	1,448	1,478	1,501	1,2	6,768	7,541	7,735	7,868	7,963
0,35	1,607	1,655	1,704	1,740	1,770	1,4	7,136	8,060	8,202	8,294	8,364
0,40	1,845	1,909	1,956	1,997	2,031	1,6	7,211	8,151	8,400	8,508	8,565
0,45	2,086	2,145	2,206	2,251	2,286	1,8	8,263	8,460	8,586	8,649	8,697
0,50	2,327	2,397	2,456	2,503	2,539	2,0	8,411	8,610	8,687	8,742	8,784
0,55	2,552	2,643	2,713	2,762	2,800	3,0	8,770	8,914	8,962	9,006	9,022
0,60	2,825	2,905	2,981	3,034	3,076	4,0	8,964	9,038	9,084	9,110	9,131
0,65	3,091	3,183	3,269	3,331	3,376	5,0	9,060	9,127	9,168	9,175	9,189
0,70	3,373	3,476	3,577	3,648	3,704						

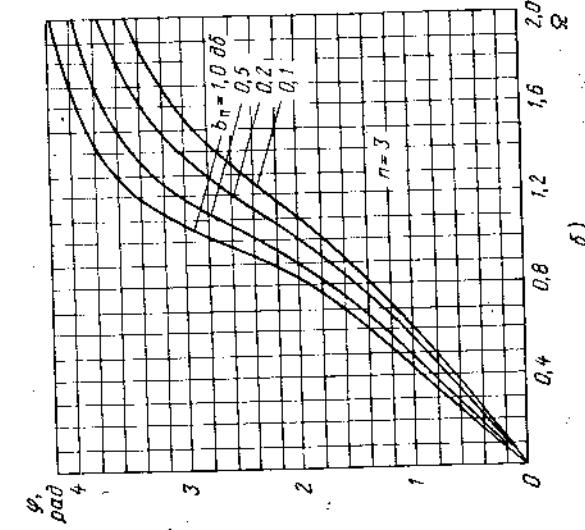
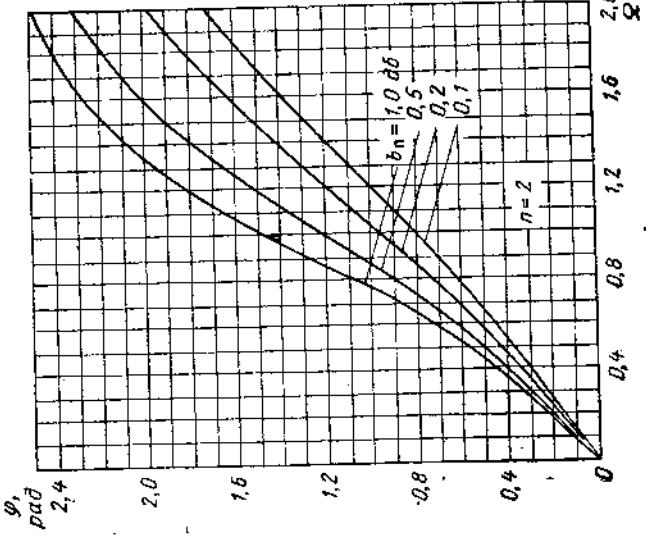


Рис. 8.12. Фазо-частотные характеристики фильтров чебышевского типа.

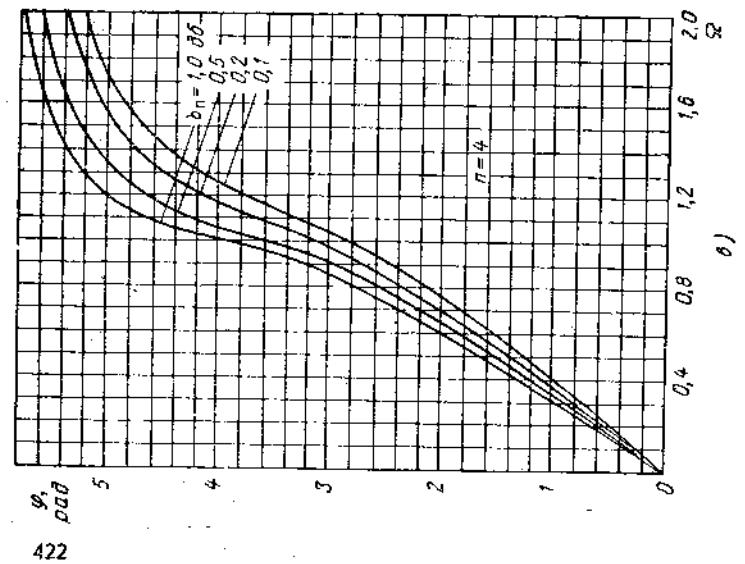


Рис. 8.12. Фазо-частотные характеристики фильтров чебышевского типа.

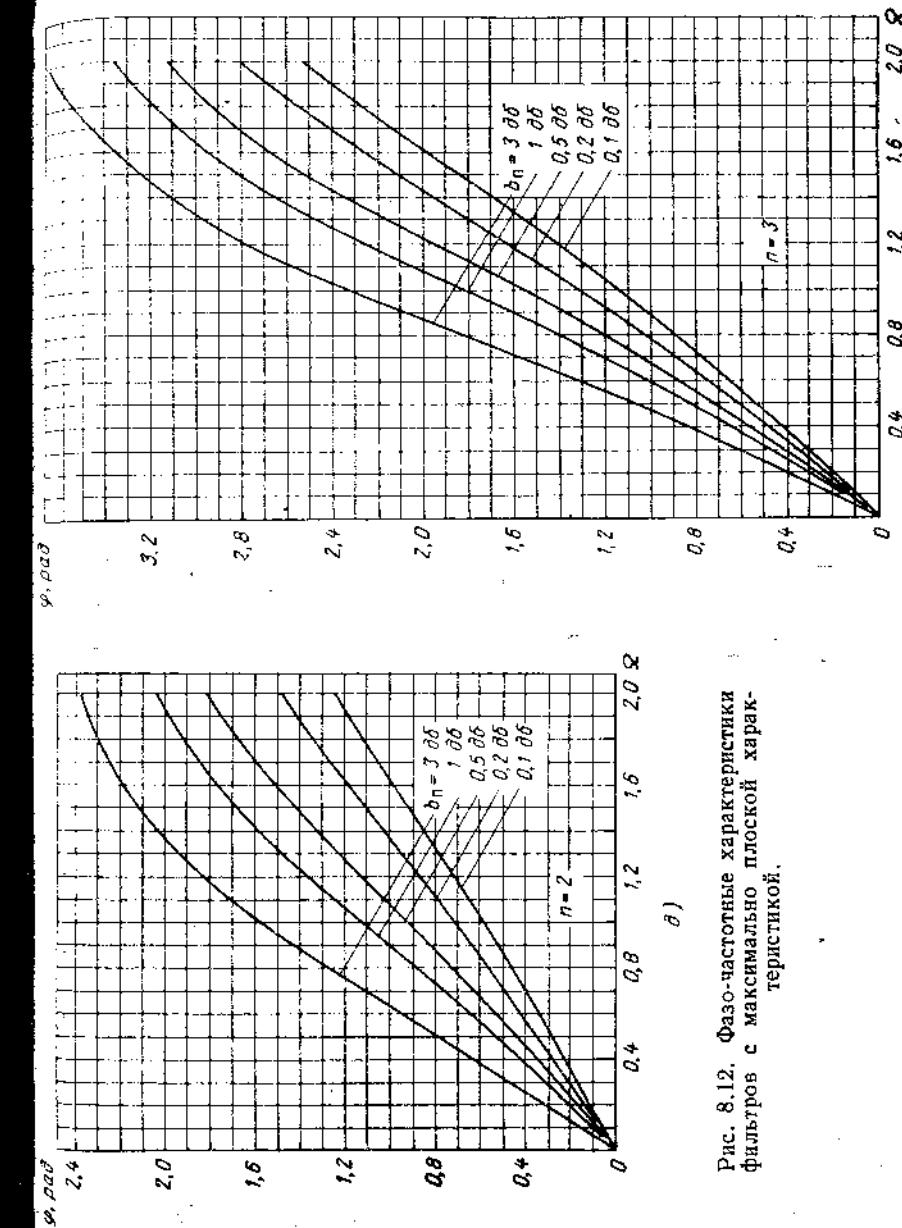
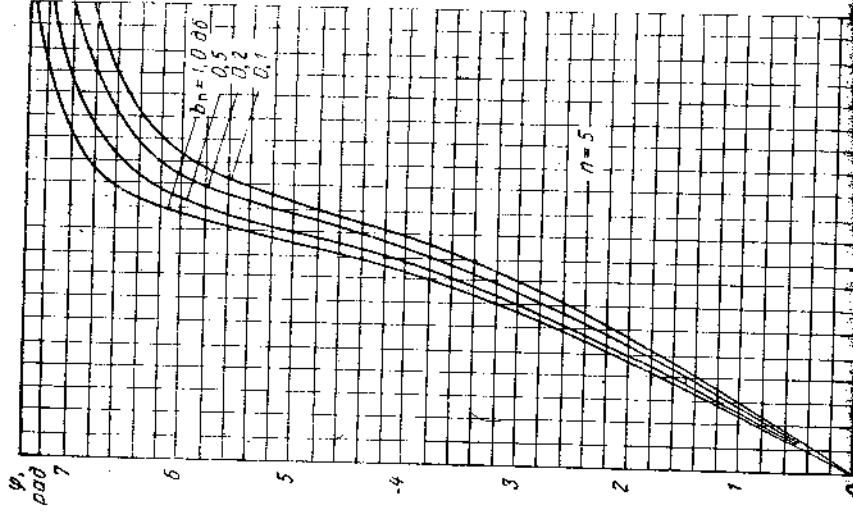


Рис. 8.12. Фазо-частотные характеристики фильтров с максимально плоской характеристикой.

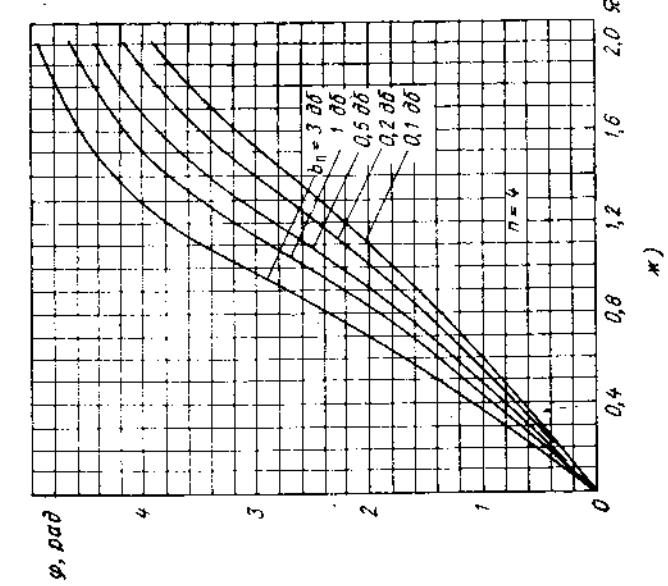
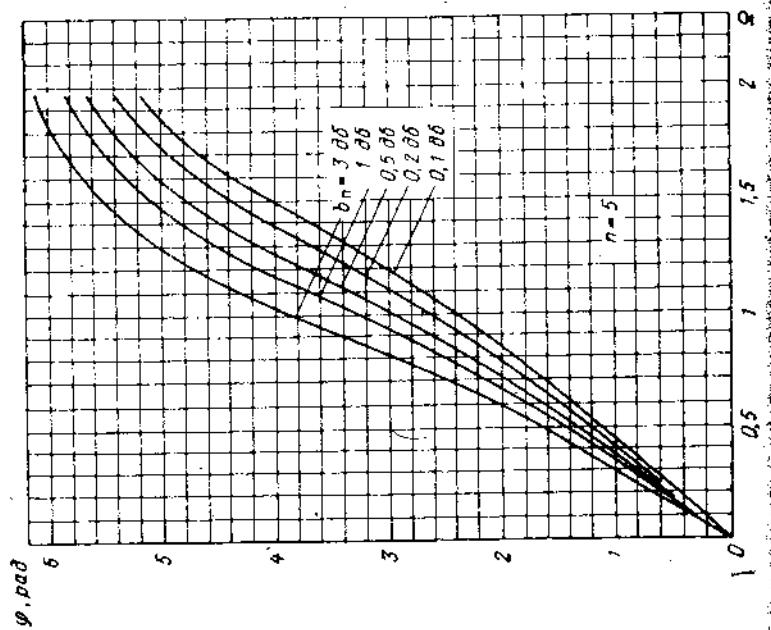


Рис. 8.12. Фазо-частотные характеристики фильтров с максимально плоской характеристикой.



Сравнение фазо-частотных характеристик фильтров максимального плоского и чебышевского типов с $n=6$ при $b_n=0,5 \text{ дБ}$ дано на рис. 8.12, и.

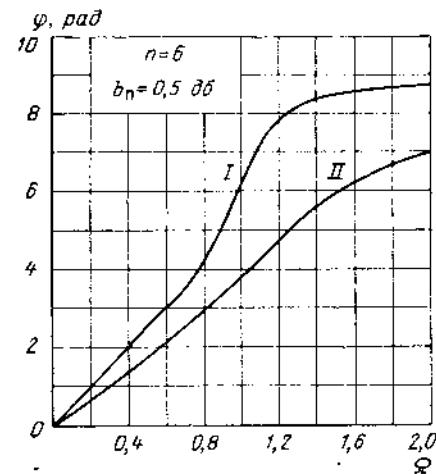


Рис. 8.12, и. Сравнение фазо-частотных характеристик фильтров:
I — чебышевского;
II — максимально плоского.

8.6. РАСЧЕТ ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕГО ФИЛЬТРА (ПЗФ) С ЧЕТВЕРЬВОЛНОВЫМИ СВЯЗЯМИ

Схема ПЗФ с четвертьволновыми связями изображена на рис. 8.13. Ее расчет удобно проводить с помощью прототипа, в качестве которого будет использован ППФ (рис. 8.4), рассмотренный в предыдущих разделах. Ниже дана методика расчета ПЗФ с помощью такого прототипа.

1. Задано шесть величин, характеризующих требуемые электрические свойства ПЗФ — граничные частоты

$$f_p, f_{-p}, f_z, f_{-z}$$

и соответствующие затухания

$$b_p \text{ (либо } |\Gamma|_{\max} \text{)} \text{ и } b_z \text{ (дБ).}$$

Смысл этих величин иллюстрирован рис. 8.14.

2. По заданным выше параметрам ПЗФ устанавливаем соответствующие параметры прототипа ППФ. Связь между параметрами ПЗФ и прототипа определяется следующими соотношениями:

$$\tau_p^I = \tau_p^{II} = S; \quad (8.18)$$

$$b_n^I = b_n^{II}; \quad b_3^I = b_3^{II}; \quad (8.19)$$

$$\eta_n^I = \eta_n^{II}; \quad (8.20)$$

$$\frac{\tau_{n3}^I}{S} \cdot \frac{\tau_{n3}^{II}}{S} = 1; \quad (8.21)$$

$$(Q_m^I S) (Q_m^{II} S) = 1, \quad (8.22)$$

где по-прежнему

$$\tau_{n3} = \frac{f_n}{f_0} - \frac{f_0}{f_n}; \quad \tau_{n3} = \frac{f_3}{f_0} - \frac{f_0}{f_3};$$

n — число звеньев;

Q_m — нагруженная добротность m -го звена.

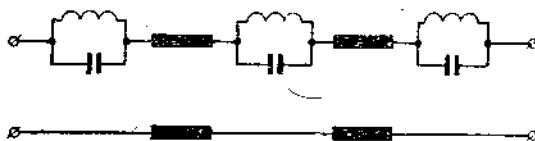


Рис. 8.13. Схема ПЗФ с четвертьволновыми связями.

Индексы «I» и «II» отмечают соответственно параметры ППФ и ПЗФ. Соотношения (8.18) — (8.22) пригодны для полиномиальных фильтров с любым типом частотной характеристики, в частности — чебышевской и максимально плоской. Для последних также бывают полезны дополнительные соотношения:

$$Q_\Phi^I Q_\Phi^{II} = \frac{1}{S^2}, \quad (8.23)$$

где

$$Q_\Phi^I = \frac{\sqrt[n]{h}}{S}; \quad Q_\Phi^{II} = \frac{1}{S \sqrt[n]{h}} \quad (8.24)$$

— добротность всего фильтра (по уровню 3 дБ) и

$$Q_m^{II} = \frac{Q_\Phi^{II}}{\sin \frac{2m-1}{2n} \pi} \quad (8.25)$$

(сравнить с формулой (8.12) для ППФ).

3. Используя (8.18) — (8.21), находим τ_n и τ_3 прототипа, затем проводим для него обычный расчет: по формулам (8.7) либо (8.8) определяем число звеньев; по формуле (8.12) либо по табл. 8.2 находим нагруженные добротности Q_m звеньев. После этого из (8.22) легко находим нагруженные добротности звеньев искомого ПЗФ.

4. Реализация LC -контуров на СВЧ может быть выполнена различными способами; некоторые типы резонаторов для ПЗФ

показаны на рис. 8.15. Нагруженная добротность каждого объемного резонатора расчетными либо экспериментальными методами доводится до требуемой величины Q_m (с учетом зависимостей величины четвертьволновых связей от частоты).

Пример. Найти параметры полосно-заграждающего фильтра, для которого прототипом служит ППФ, рассчитанный в § 8.3.

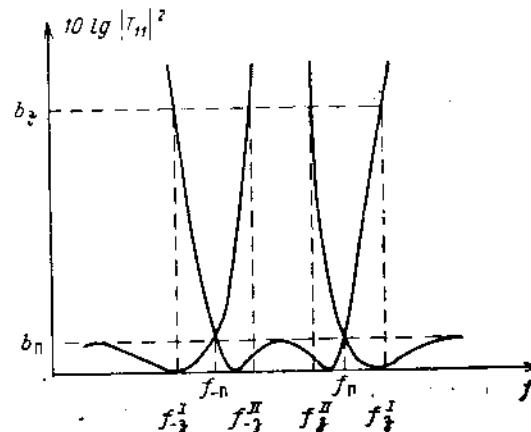


Рис. 8.14. Частотные характеристики ПЗФ и ППФ.

Для прототипа имеем:

$$S = \eta_n^I = 0,06; \quad \eta_3^I = 0,07; \quad |\Gamma|_{\max} = 0,2; \quad b_3^I = 15 \text{ дБ},$$

$$n = 7; \quad Q_1 S = Q_7 S = 0,667; \quad Q_2 S = Q_6 S = 0,694,$$

$$Q_3 S = Q_5 S = 1,12; \quad Q_4 S = 0,758.$$

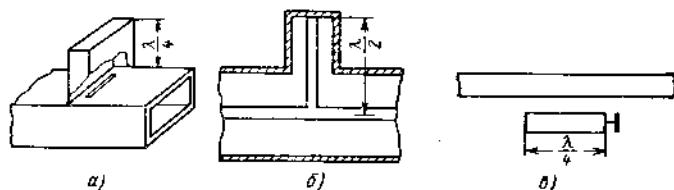
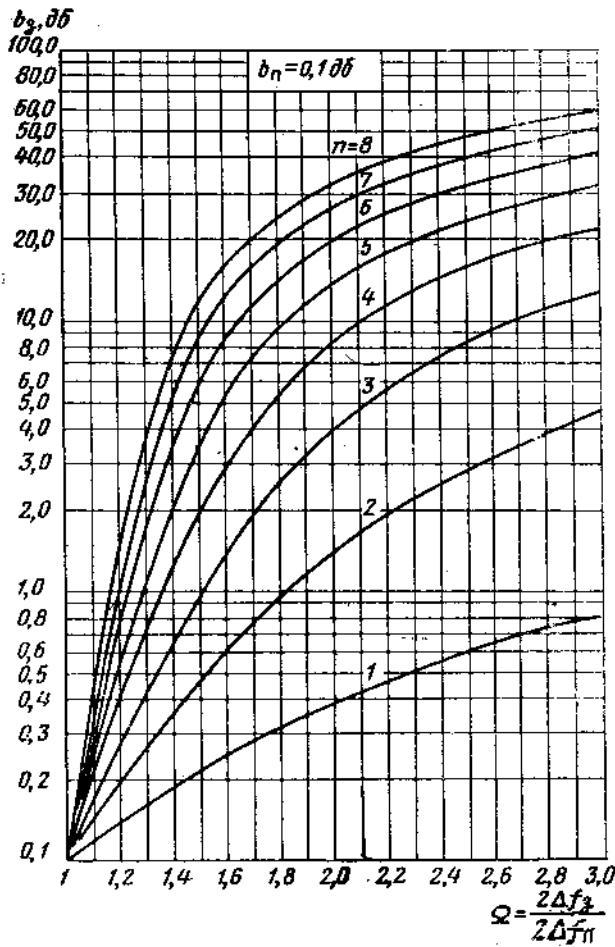


Рис. 8.15. Некоторые типы резонаторов для ПЗФ:
а — волноводный; б — коаксиальный; в — полосковый.

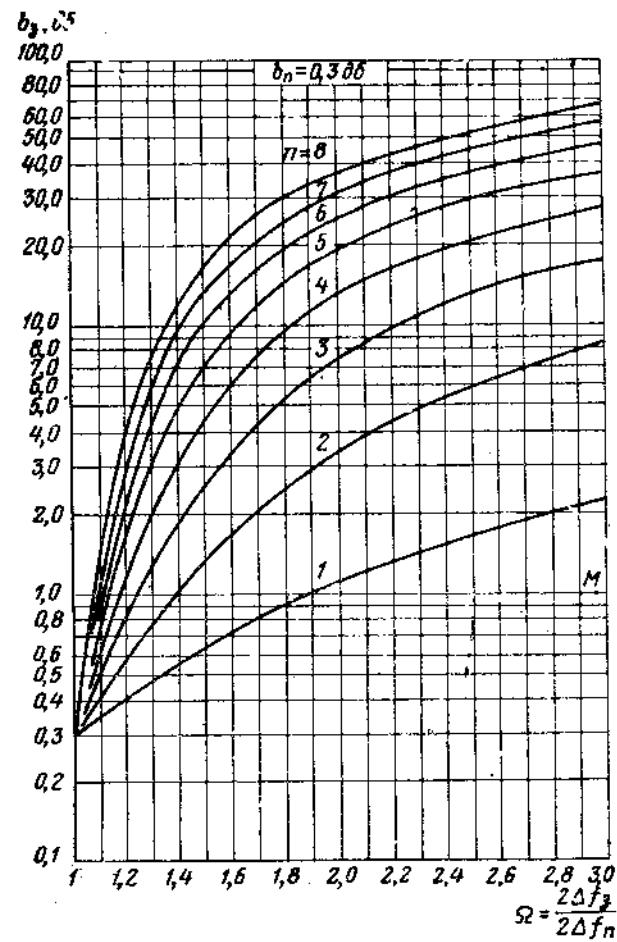
Из (8.21) и (8.22) находим

$$\frac{\tau_{n3}^{II}}{S} = \frac{S}{\eta_3^I} = \frac{0,06}{0,07} = 0,86,$$



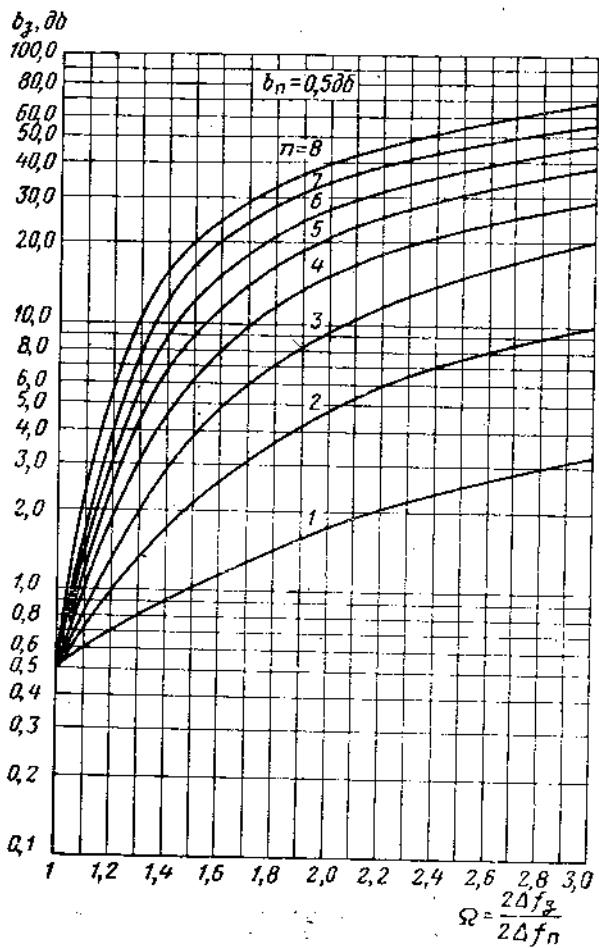
a)

Рис. 8.16. Графики для определения количества звеньев фильтра с максимально плоской характеристикой.



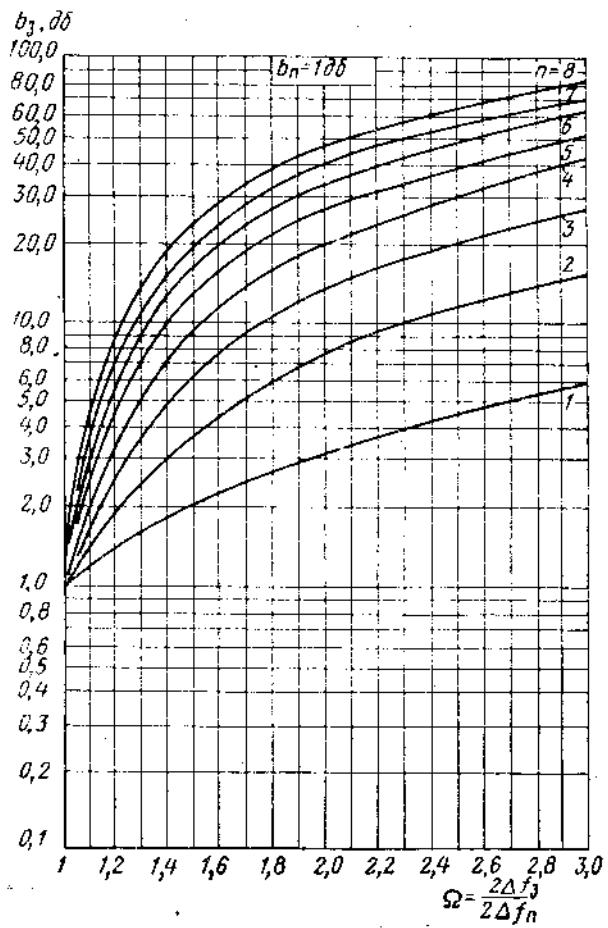
б)

звеньев фильтра с максимально плоской характеристикой.



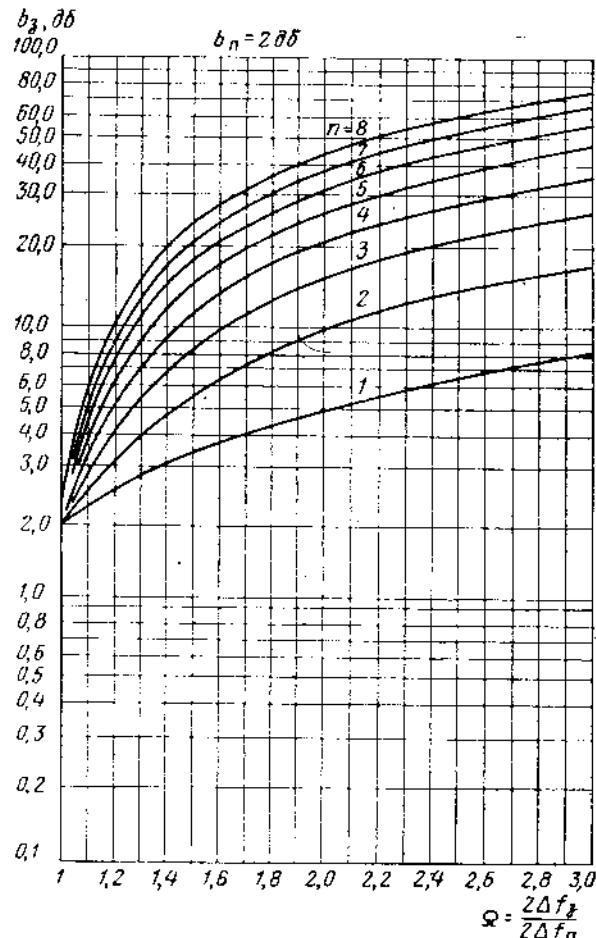
б)

Рис. 8.16. Графики для определения количества звеньев



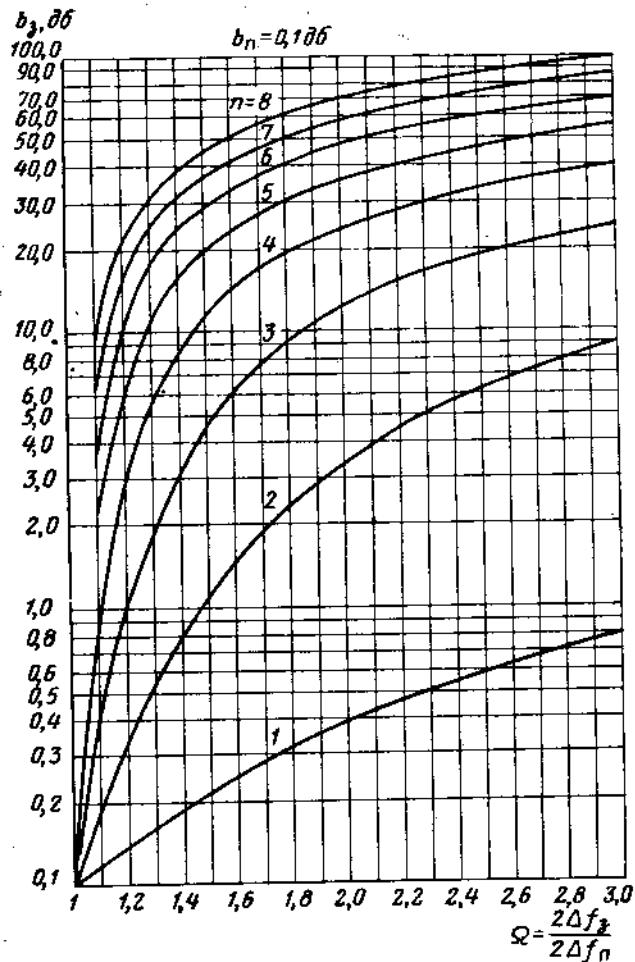
е)

фильтра с максимально плоской характеристикой.



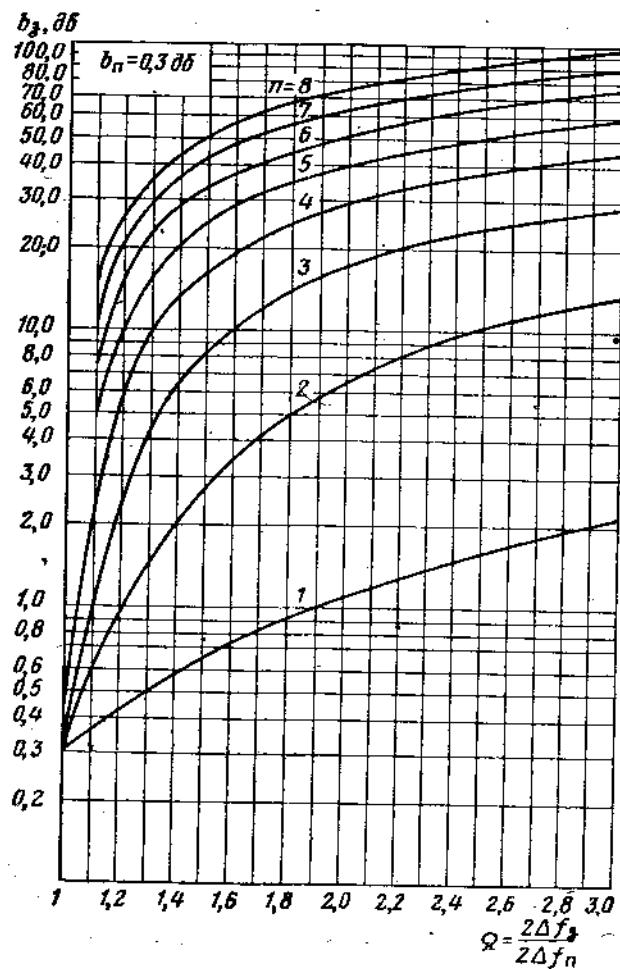
д)

Рис. 8.16. Графики для определения количества звеньев фильтра с максимально плоской характеристикой.



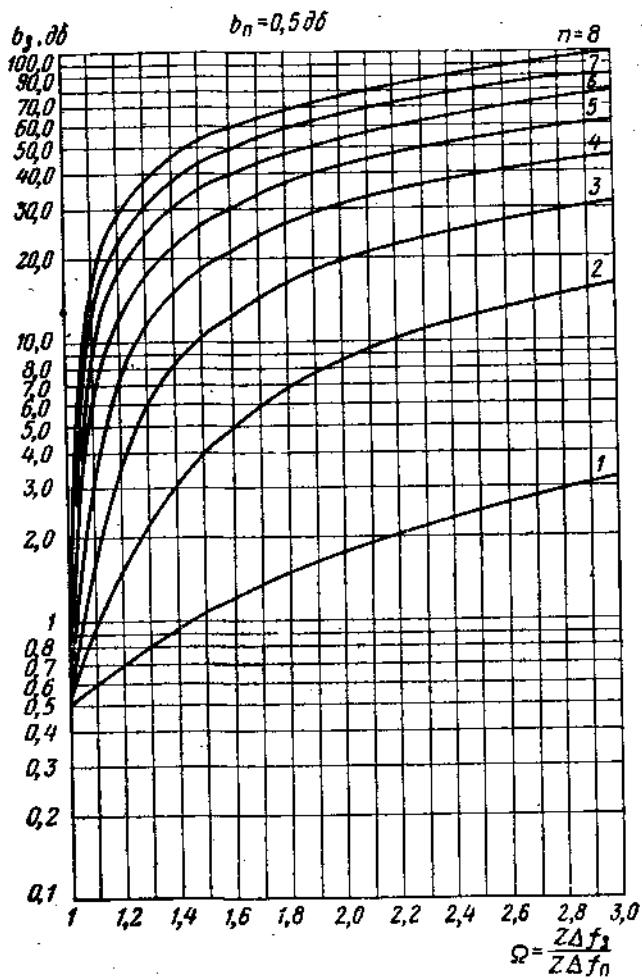
а)

Рис. 8.17. Графики для определения количества звеньев фильтра с чебышевской характеристикой.



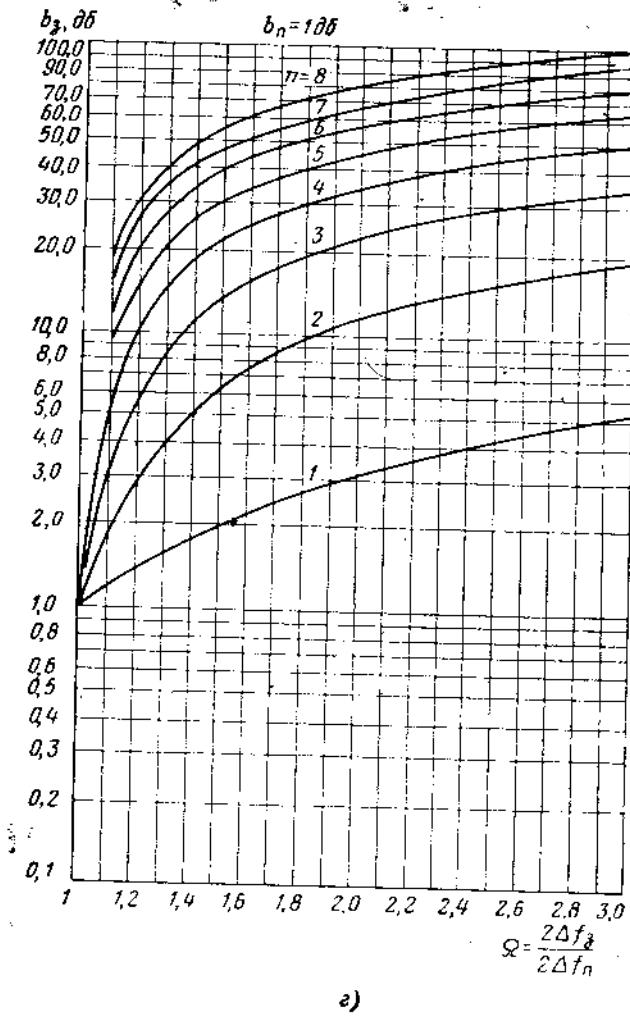
б)

Рис. 8.17. Графики для определения количества



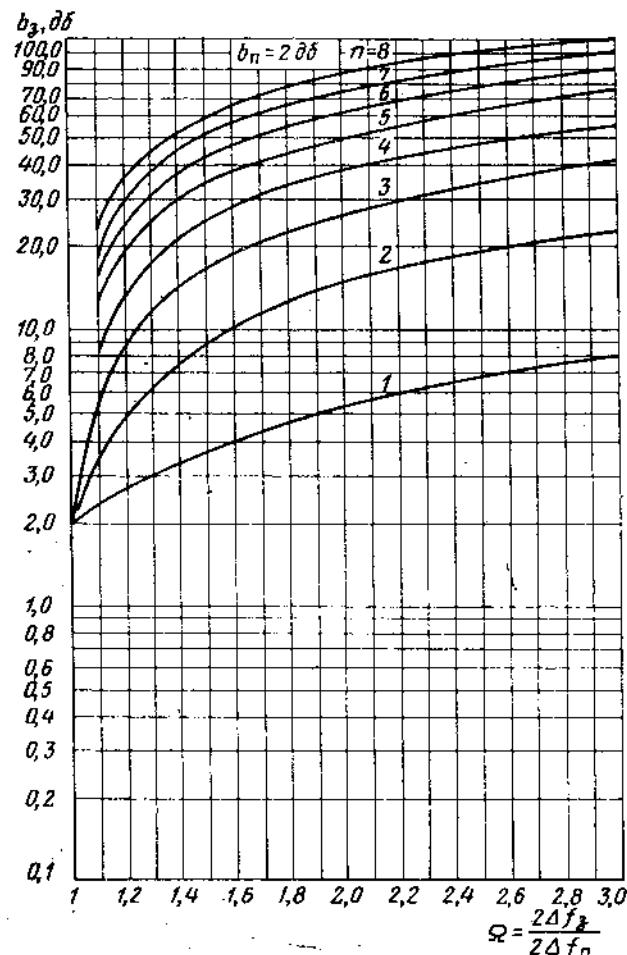
б)

звеньев фильтров с чебышевской характеристикой:



a)

Рис. 8.17. Графики для определения количества



б)

звеньев фильтров с чебышевской характеристикой:

$$Q_1^{\text{II}} S = \frac{1}{Q_1^{\text{I}} S} = \frac{1}{0,667} = 1,49 = Q_7^{\text{II}} S;$$

$$Q_2^{\text{II}} S = \frac{1}{Q_2^{\text{I}} S} = \frac{1}{0,694} = 1,44 = Q_6^{\text{II}} S;$$

$$Q_3^{\text{II}} S = \frac{1}{Q_3^{\text{I}} S} = \frac{1}{1,12} = 0,895 = Q_5^{\text{II}} S,$$

$$Q_4^{\text{II}} S = \frac{1}{Q_4^{\text{I}} S} = \frac{1}{0,785} = 1,27.$$

Далее делением на S легко найти значения Q_m звеньев ПЗФ.

ЛИТЕРАТУРА

- Беледкий А. Ф. Теоретические основы электропроводной связи, ч. III. Синтез реактивных четырехполюсников и электрических фильтров. Связьиздат, 1959.
- «Линии передачи сантиметровых волн», ч. II., пер., с англ. под ред. Г. А. Ремеза. Изд-во «Советское радио», 1951.
- Явич Л. Р. Некоторые вопросы проектирования широкополосных разрядников. «Радиотехника и электроника», 1958, т. 3, № 1.
- Mumford W. Maximally-flat Filters in Waveguide, Bell Syst. Technic. J., 1948, 27, № 4.
- Graven G., Levin L. Design of Microwave Filters with Quarter-wave Couplings, Proc. Inst. of Electrical Engineers, 1956, Pt. B., v. 103, № 8.
- Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. Госэнергиздат, 1963.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ СВЧ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМИ СВЯЗЯМИ

9.1. ИСХОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Преимуществом фильтров с непосредственными связями являются их малые габариты [1]. Расчет фильтров с непосредственными связями основан на сравнении каждого звена фильтра с соответствующим звеном некоторого выбранного прототипа. Известны две системы такого расчета. В первой из них [2, 3] прототипом служит ступенчатый переход, во второй [4] — фильтр нижних частот, составленный из сосредоточенных (LC) элементов.

9.2. СТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕХОД КАК ПРОТОТИП ФИЛЬТРА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМИ СВЯЗЯМИ

Ступенчатый переход, предназначенный для согласования двух активных волновых сопротивлений (см. гл. 6), обладает некоторым фильтрующим действием, однако фильтрация эта, как правило, незначительна.

Существенное увеличение фильтрующего действия ступенчатого перехода может быть достигнуто лишь путем весьма значительного увеличения перепада волнового сопротивления R на концах перехода (до уровня миллионов и более). Переход является при этом лишь расчетной моделью и вопросы его конструктивной реализуемости не рассматриваются. Такие переходы уже могут служить прототипом фильтров с непосредственными связями.

Если переход рассматривается как фильтр, методика его расчета изменяется.

Заданными параметрами являются: полоса пропускания W_n и допуск на рассогласование в этой полосе $|\Gamma|_{\max}$ (либо соответствующее значение затухания вследствие отражения b_n), а также полоса заграждения W_3 и уровень заграждения b_3 .

Частотная характеристика ступенчатого перехода при использовании его в качестве прототипа фильтра задается в виде

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 T_n^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right), \quad (9.1)$$

(чебышевская характеристика)

либо $|T_{11}|^2 = 1 + h^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right)^{2n}$, (9.2)

(максимально плоская характеристика).
Здесь n — число ступенек;

$T_n \left(\frac{\cos \theta}{S} \right)$ — полином Чебышева 1-го рода n -го порядка;

h, S — нормирующие множители: h — по амплитуде и S — по частоте;
 $\theta = \frac{2\pi l}{\Lambda}$ — электрическая длина ступеньки.

Примерный вид зависимости рабочего затухания $b = 10 \lg |T_{11}|^2$ от θ изображен на рис. 9.1.

Необходимое число звеньев ступенчатого перехода, используемого в качестве фильтра, определяется соотношениями:

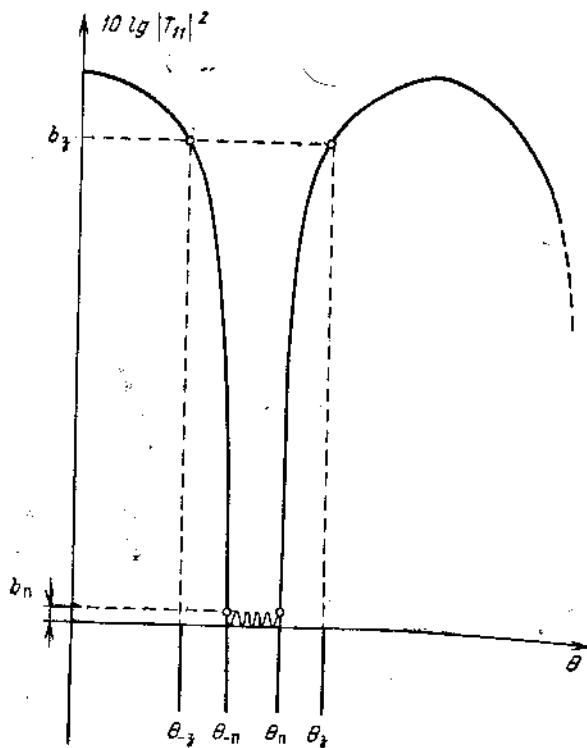


Рис. 9.1. Рабочее затухание ступенчатого перехода, используемого в качестве прототипа фильтра.

а) чебышевская характеристика

$$n = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\sin \frac{\pi}{4} W_3} \approx \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\operatorname{ar ch} \frac{W_3}{W_n}} ; \quad (9.3)$$

б) максимально плоская характеристика

$$n = \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\sin \frac{\pi}{4} W_3} \approx \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\lg \frac{W_3}{W_n}} , \quad (9.4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} W_n &= \frac{\theta_n - \theta_{-n}}{\theta_0} = 2 \frac{\Lambda_{-n} - \Lambda_n}{\Lambda_{-n} + \Lambda_n} ; \\ W_3 &= \frac{\theta_3 - \theta_{-3}}{\theta_0} = 2 \frac{\Lambda_{-3} - \Lambda_3}{\Lambda_{-3} + \Lambda_3} ; \\ \theta_n &= \frac{2\pi l}{\Lambda_n} ; \quad \theta_3 = \frac{2\pi l}{\Lambda_3} ; \\ L_n &= \operatorname{ant} \lg \frac{b_n}{10} ; \quad L_3 = \operatorname{ant} \lg \frac{b_3}{10} , \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

а смысл обозначений пояснен на рис. 9.1.

Зависимость числа звеньев n от W_n и W_3 для практически распространенных сочетаний технических требований приведена на рис. 9.2 и 9.3. Эти графики рассчитаны по формулам (9.3) и (9.4)¹. Перепады волновых сопротивлений ступенек прототипа ($q_i = \frac{p_{i+1}}{p_i}$), найденные с помощью классического метода синтеза [5], сведены в табл. 9.1 — 9.4.

Здесь крайний левый столбец — полоса пропускания ступенчатого перехода. Полоса заграждения обеспечивается выбором числа ступенек n (по формулам (9.3) и (9.4), либо графикам рис. 9.2 и 9.3).

Расчет фильтров с непосредственными связями по выбранному выше прототипу основывается на приравнивании коэффициентов передачи (T_{11}) звена искомого фильтра и звена известного прототипа, откуда следует расчетное соотношение [3], пригодное для любого типа фильтров с непосредственными связями:

$$M_L = \frac{q_i + 1}{2 \sqrt{q_i}} . \quad (9.6)$$

¹ Приближенные выражения в (9.3) и (9.4) можно применять при полосах W_n и W_3 , меньших 30%.

При этом должно выполняться условие

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_i = \Phi_{i+1} = \Phi, \\ \varphi(f_0) = \frac{\pi}{2}, \end{array} \right\} \quad (9.7)$$

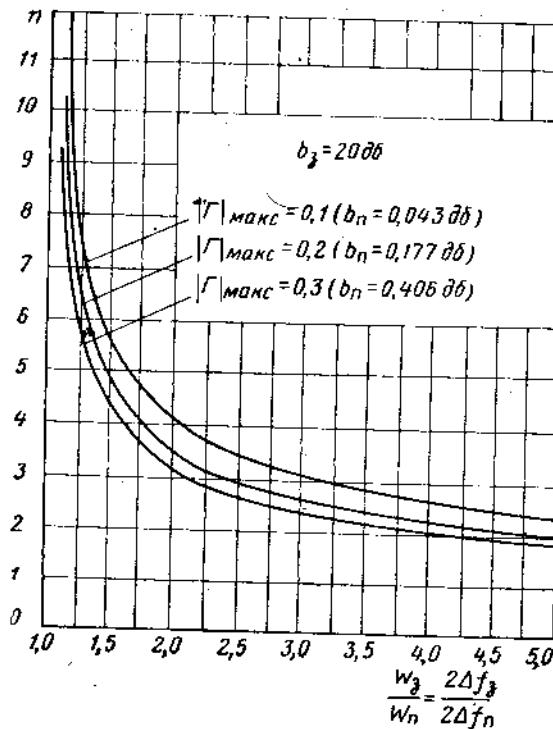
здесь q_i — перепад волнового сопротивления i -й ступеньки прототипа (ступенчатого перехода);

M_i — модуль коэффициента передачи i -го звена искомого фильтра;

φ_i — фаза коэффициента передачи i -го звена искомого фильтра;

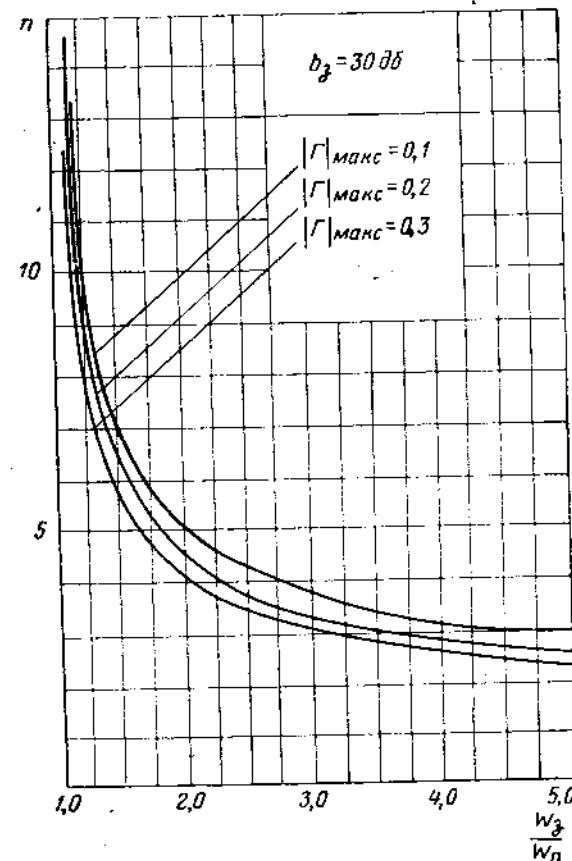
f_0 — средняя частота полосы пропускания.

Ниже даны различные случаи применения этих соотношений.



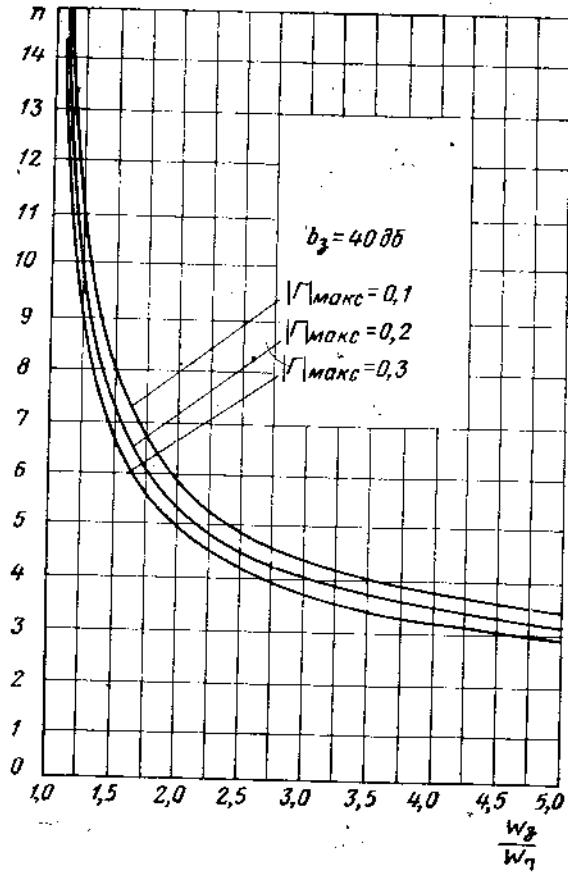
a)

Рис. 9.2. Зависимость количества звеньев чебышев лосы пропускания ($2\Delta f_n$), полосы заграждения ($2\Delta f_3$), в полосе пропуска



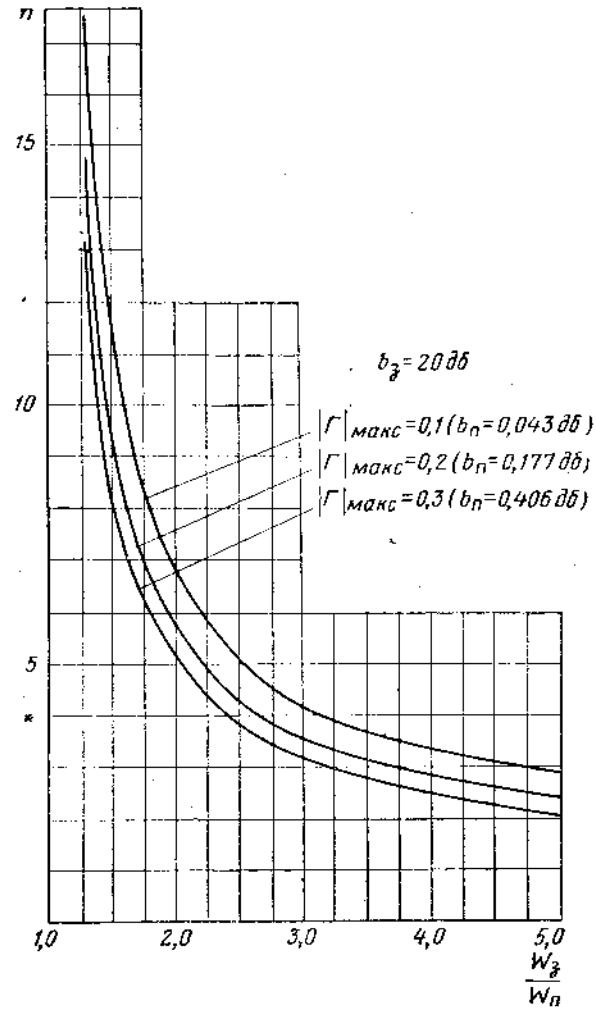
b)

ского фильтра от заданных технических условий: по уровня заграждения (b_3) и допуска на рассогласование ($|Γ|_{\max}$).



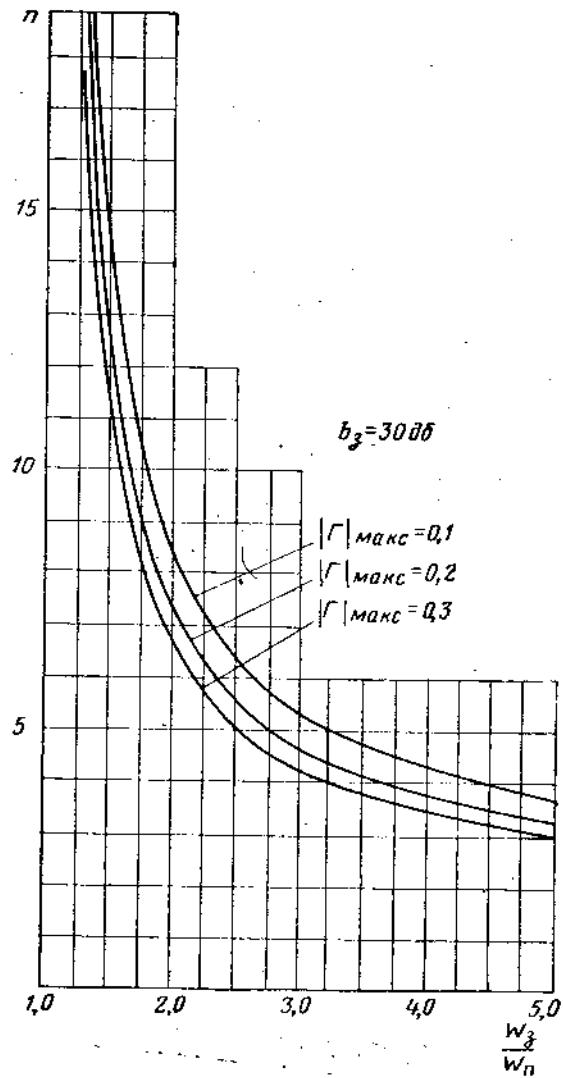
б)

Рис. 9.2. Зависимость количества звеньев чебышевского фильтра от заданных технических условий: полосы пропускания ($2\Delta f_n$), полосы заграждения ($2\Delta f_3$), уровня заграждения (b_3) и допуска на рассогласование в полосе пропускания ($|\Gamma|_{\text{макс}}$).



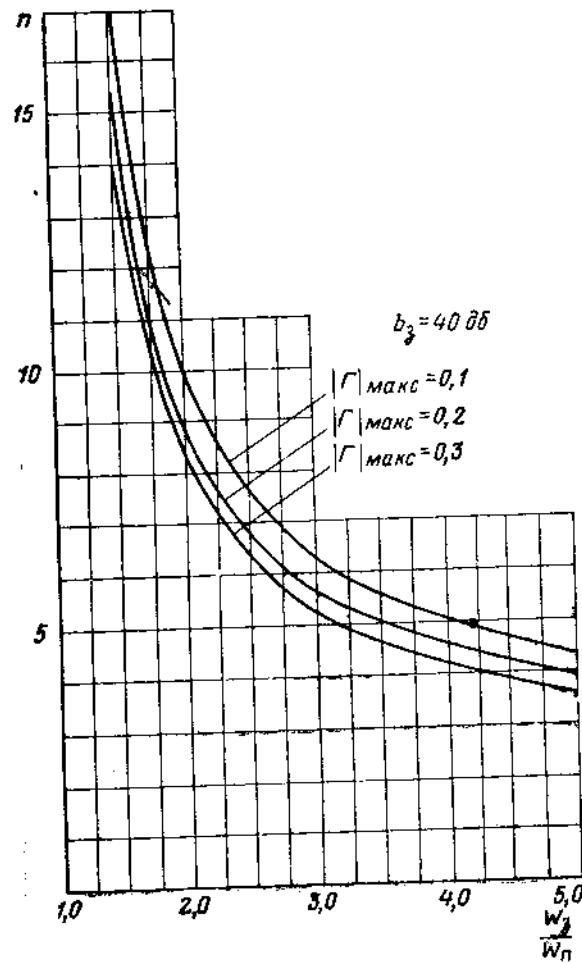
а)

Рис. 9.3. Зависимость количества звеньев фильтра с максимальной плоской характеристикой от заданных технических условий: полосы пропускания ($2\Delta f_n$), полосы заграждения ($2\Delta f_3$), уровня заграждения (b_3) и допуска на рассогласование в полосе пропускания ($|\Gamma|_{\text{макс}}$).



б)

Зависимость количества звеньев фильтра с максимальных технических условий: полосы пропускания ($2\Delta f_0$), допуска на рассогласование



б)

мально плоской частотной характеристикой от заданной полосы заграждения ($2\Delta f_3$), уровня заграждения (b_3) и в полосе пропускания ($| \Gamma |_{\max}$).

Таблица 9.1
Прототипный ступенчатый переход с чебышевской характеристикой $|\Gamma|_{\max} = 0,1$

$\frac{2 \Delta f_{\text{п}}}{f_0} \%$	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_s$	q_2	$q_1=q_s$	$q_2=q_s$	$q_1=q_s$	$q_2=q_s$
0,2	42442	147383,1	543,33	38,828,6	594,13	488803,1
0,4	212,21	36845,8	271,67	95457,1	297,06	827303,5
0,6	141,47	16375,9	181,11	42425,4	198,04	206325,9
0,8	106,10	9211,4	135,83	23864,3	148,53	91922,6
1,0	84,885	5895,3	108,67	15273,1	118,82	51706,5
1,2	70,737	4094,0	90,556	10606,3	99,021	33092,1
1,4	60,632	3007,8	77,619	7792,4	84,875	22980,6
1,6	53,053	2302,8	67,917	5966,07	74,265	16883,7
1,8	47,158	1819,5	60,370	4713,90	66,014	12926,6
2,0	42,442	1473,8	54,333	3818,28	59,413	10213,6
4	21,218	368,35	27,175	954,00	29,790	8273,0
6	14,144	163,69	18,124	423,70	19,868	2071,36
8	10,607	92,055	13,600	238,10	14,909	919,41
10	8,485	58,902	10,888	152,19	11,936	516,30
12	7,070	40,896	9,081	105,52	9,935	329,70
14	6,060	30,043	7,792	77,388	8,542	228,35
16	5,302	23,002	6,826	59,127	7,483	167,24
18	4,714	18,179	6,075	46,608	6,661	127,58
20	4,243	14,733	5,476	37,654	6,003	100,39
22	3,859	12,187	4,986	31,030	5,467	80,941
24	3,542	10,254	4,578	25,992	5,020	66,555
26	3,271	8,754	4,234	22,073	4,643	55,616
28	3,041	7,568	3,939	18,964	4,320	47,106
30	2,843	6,614	3,685	16,457	4,041	40,355
32	2,671	5,838	3,462	14,406	3,798	34,911
			5,		18,955	30,458

Продолжение табл. 9.1

$\frac{2 \Delta f_{\text{п}}}{f_0} \%$	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_s$	q_2	$q_1=q_s$	$q_2=q_s$	$q_1=q_s$	$q_2=q_s$
34	2,521	5,198	3,266	12,707	3,583	16,768
36	2,388	4,665	3,092	11,285	3,393	14,934
38	2,271	4,218	2,937	10,082	3,224	13,383
40	2,166	3,839	2,797	9,057	3,071	12,058
42	2,073	3,517	2,672	8,175	2,934	10,918
44	1,990	3,240	2,558	7,413	2,810	9,930
46	1,915	3,001	2,454	6,748	2,696	9,068
48	1,848	2,794	2,359	6,167	2,593	8,312
50	1,788	2,614	2,272	5,655	2,498	7,645
52	1,733	2,457	2,192	5,203	2,410	7,053
54	1,683	2,318	2,118	4,802	2,330	6,526
56	1,638	2,196	2,050	4,444	2,255	6,054
58	1,598	2,089	1,986	4,125	2,186	5,631
60	1,561	1,993	1,927	3,839	2,122	5,249
62	1,527	1,908	1,873	3,581	2,062	4,904
64	1,496	1,832	1,822	3,350	2,006	4,591
66	1,468	1,764	1,775	3,141	1,953	4,306

$\frac{2\Delta f_n}{f_0}$, %	n = 2			n = 3			n = 4		
	$q_1 = q_3$	q_1	q_3	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_3$	$q_1 = q_2$	$q_1 = q_3$	$q_2 = q_4$	$q_1 = q_4$
68	1,442	1,702	1,730	2,952	1,904	4,046	4,518		
70	1,419	1,647	1,689	2,780	1,858	3,808	5,135		
72	1,397	1,597	1,650	2,625	1,815	3,590	4,786		
74	1,377	1,552	1,614	2,484	1,774	3,390	4,466		
76	1,359	1,511	1,580	2,357	1,735	3,207	4,174		
78	1,342	1,473	1,548	2,240	1,699	3,037	3,907		
80	1,326	1,439	1,519	2,135	1,664	2,880	3,662		
82	1,312	1,408	1,491	2,039	1,632	2,735	3,437		
84	1,298	1,379	1,465	1,950	1,601	2,602	3,230		
86	1,286	1,353	1,441	1,871	1,571	2,478	3,040		
88	1,274	1,329	1,418	1,799	1,544	2,363	2,865		
90	1,264	1,306	1,397	1,732	1,517	2,256	2,705		
92	1,254	1,286	1,377	1,672	1,492	2,158	2,557		
94	1,245	1,267	1,359	1,617	1,468	2,066	2,421		
96	1,236	1,249	1,342	1,566	1,446	1,981	2,297		
98	1,228	1,233	1,325	1,521	1,424	1,902	2,182		
100	1,220	1,218	1,310	1,478	1,404	1,829	2,077		

Продолжение табл. 9.1

$\frac{2\Delta f_n}{f_0}$, %	n = 5			n = 6			n = 7		
	$q_1 = q_4$	$q_1 = q_3$	$q_3 = q_4$	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_3$	$q_1 = q_2$	$q_3 = q_4$	$q_1 = q_3$	$q_2 = q_4$
0,2	619,58	541273	100286	633,96	570331	1085329	1190786		
0,4	309,79	135318	250717	316,98	142582	2711332	297696		
0,6	206,53	60141	111429	211,32	63370	120592	132309		
0,8	154,89	33829	62679	158,49	35645	67833	74424		
1,0	123,92	21651	40114	126,79	228,3	43413	47631		
1,2	103,26	15085	27857	105,66	15842	30148	33077		
1,4	88,511	11046	20466	90,565	11639	22149	24301		
1,6	77,447	8457,4	156669	79,245	8911,4	16958	18606		
1,8	68,842	6682,4	12381	70,440	7041,1	13399	14701		
2,0	61,958	54127	10028	62,396	5703,3	10853	11908		
4	30,979	1353,2	2507,2	31,698	1425,8	2713,3	2976,9		
6	20,665	601,42	1114,3	21,132	633,70	1205,9	1323,1		
8	15,508	338,29	626,79	15,849	356,46	678,33	744,24		
10	12,415	216,51	401,15	12,679	228,13	434,13	476,31		
12	10,355	150,35	278,57	10,695	158,43	301,48	330,77		
14	8,885	110,46	204,67	9,174	116,39	221,49	243,02		
16	7,784	84,356	156,70	8,000	89,114	169,58	186,06		
18	6,928	66,657	123,81	7,117	70,411	133,99	147,01		
20	6,244	53,984	100,28	6,410	57,143	108,53	119,08		
22	5,686	44,602	82,881	5,814	47,170	89,696	98,412		
24	5,222	37,464	67,008	5,353	40,000	75,37	82,890		
26	4,829	31,908	57,205	4,938	33,898	64,220	70,460		
28	4,494	27,498	49,282	4,587	28,985	55,374	60,750		
30	4,203	23,941	42,820	4,300	25,272	46,754	52,924		
32	3,950	21,030	37,497	4,041	22,203	40,917	45,368		

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$n = 5$				$n = 6$			
	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_3$	$q_3 = q_4$	$q_1 = q_7$	$q_2 = q_4$	$q_3 = q_7$	$q_4 = q_7$	$q_5 = q_4$
34	3,727	18,617	33,068	3,812	19,661	36,081	40,052	
36	3,529	16,595	29,346	3,610	17,530	32,029	35,598	
38	3,353	14,884	26,192	3,430	15,727	28,601	31,827	
40	3,195	13,424	23,496	3,268	14,188	25,675	28,607	
42	3,052	12,167	21,175	3,121	12,864	23,158	25,835	
44	2,922	11,078	19,163	2,989	11,717	20,977	23,431	
46	2,805	10,128	17,408	2,868	10,716	19,076	21,334	
48	2,697	9,294	15,868	2,758	9,838	17,408	19,492	
50	2,599	8,559	14,508	2,658	9,063	15,937	17,867	
52	2,508	7,907	13,305	2,565	8,377	14,634	16,424	
54	2,424	7,326	12,232	2,479	7,765	13,473	15,139	
56	2,347	6,807	11,274	2,400	7,218	12,436	13,988	
58	2,275	6,340	10,413	2,327	6,727	11,505	12,953	
60	2,208	5,920	9,638	2,258	6,285	10,666	12,020	
62	2,146	5,540	8,938	2,195	5,885	9,908	11,175	
64	2,088	5,195	8,303	2,136	5,522	9,221	10,407	
66	2,034	4,881	7,725	2,080	5,191	8,597	9,706	

Продолжение табл. 9.1

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$n = 5$				$n = 6$			
	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_3$	$q_3 = q_4$	$q_1 = q_7$	$q_2 = q_4$	$q_3 = q_7$	$q_4 = q_7$	$q_5 = q_4$
68	1,983	4,595	7,200	2,028	4,890	8,027	9,069	
70	1,936	4,332	6,719	1,979	4,615	7,507	8,484	
72	1,891	4,092	6,278	1,934	4,362	7,030	7,946	
74	1,848	3,871	5,874	1,891	4,130	6,592	7,451	
76	1,809	3,667	5,502	1,850	3,916	6,189	6,995	
78	1,771	3,479	5,160	1,812	3,718	5,817	6,573	
80	1,736	3,305	4,844	1,775	3,536	5,474	6,182	
82	1,702	3,144	4,552	1,741	3,366	5,156	5,819	
84	1,670	2,995	4,281	1,709	3,209	4,862	5,482	
86	1,639	2,855	4,031	1,678	3,063	4,588	5,167	
88	1,611	2,726	3,798	1,649	2,927	4,334	4,875	
90	1,589	2,605	3,582	1,621	2,800	4,097	4,601	
92	1,557	2,492	3,381	1,594	2,682	3,877	4,346	
94	1,533	2,387	3,194	1,569	2,571	3,671	4,106	
96	1,509	2,288	3,020	1,545	2,467	3,478	3,882	
98	1,486	2,196	2,858	1,522	2,370	3,299	3,672	
100	1,465	2,109	2,707	1,500	2,279	3,130	3,475	

$2 \Delta f_{\Pi}$, $f_{\%}$		$n = 7$			$n = 6$			$n = 5$			$n = 4$			$n = 3$			$n = 2$		
$q_1 = q_2$	$q_1 = q_3$	$q_1 = q_4$	$q_1 = q_5$	$q_1 = q_6$	$q_1 = q_7$	$q_1 = q_8$	$q_1 = q_9$	$q_1 = q_{10}$	$q_1 = q_{11}$	$q_1 = q_{12}$	$q_1 = q_{13}$	$q_1 = q_{14}$	$q_1 = q_{15}$	$q_1 = q_{16}$	$q_1 = q_{17}$	$q_1 = q_{18}$	$q_1 = q_{19}$		
0,2	642,82	587997	1130536	1275918	648,66	599512	1158090	1321771	1360005										
0,4	321,41	146999	289634	318979	324,33	149878	28523	330443	340001										
0,6	214,28	65333	125615	141768	216,22	66612	128677	146863	151112										
0,8	160,71	36750	70658	79745	162,17	37469	72381	82611	86000										
1,0	128,57	23520	45221	51036	129,73	23980	46323	52871	54400										
1,2	107,14	163333	31403	35442	108,11	16653	32169	36716	37778										
1,4	91,832	11999	23072	26039	92,666	12235	22634	26975	27755										
1,6	80,353	9187,5	17664	19936	81,083	9367,4	18095	20653	21250										
1,8	71,425	7289,2	13957	15752	72,074	7401,4	14297	16318	16790										
2,0	64,283	5880,0	11305	12759	64,866	5995,1	11581	13218	13600										
4	32,151	1470,0	2826,3	3189,8	32,433	448,8	2895,2	3304,4	3400,0										
6	21,442	653,25	1256,2	1417,7	21,622	662,12	1286,8	1468,6	1511,2										
8	16,090	367,43	705,18	797,45	16,217	374,70	723,81	826,11	850,00										
10	12,881	235,13	450,74	510,37	13,030	239,80	463,24	528,71	544,00										
12	10,743	163,27	312,56	354,42	10,867	167,07	321,30	367,16	377,78										
14	9,218	119,93	229,25	259,18	9,324	122,74	235,68	269,75	277,55										
16	8,075	91,810	175,18	198,53	8,168	93,954	180,11	206,12	212,50										
18	7,187	72,529	138,11	156,53	7,270	74,225	148,00	163,58	167,90										
20	6,478	58,738	111,59	126,56	6,552	60,112	114,75	131,79	136,00										
22	5,898	48,534	91,976	104,40	5,966	49,671	94,587	108,79	112,40										
24	5,416	40,773	77,056	87,581	5,478	41,730	79,253	91,188	94,634										
26	5,009	34,734	65,445	74,472	5,066	35,550	67,320	77,549	80,657										
28	4,661	29,942	56,234	64,066	4,714	30,647	57,852	66,732	69,085										
30	4,359	26,076	48,804	55,673	4,409	26,692	50,215	58,099	59,833										
32	4,096	22,914	42,724	48,806	4,143	23,456	43,967	50,853	52,617										

$2 \Delta f_{\Pi}$, $f_{\%}$		$n = 7$			$n = 6$			$n = 5$			$n = 4$			$n = 3$			$n = 2$		
$q_1 = q_2$	$q_1 = q_3$	$q_1 = q_4$	$q_1 = q_5$	$q_1 = q_6$	$q_1 = q_7$	$q_1 = q_8$	$q_1 = q_9$	$q_1 = q_{10}$	$q_1 = q_{11}$	$q_1 = q_{12}$	$q_1 = q_{13}$	$q_1 = q_{14}$	$q_1 = q_{15}$	$q_1 = q_{16}$	$q_1 = q_{17}$	$q_1 = q_{18}$	$q_1 = q_{19}$		
34	3,865	20,292	37,686	43,113	3,909	20,773	38,789	44,932	46,431										
36	3,660	18,095	33,466	38,341	3,701	18,525	34,451	39,968	41,294										
38	3,477	16,236	29,895	34,302	3,516	16,623	30,780	35,715	36,970										
40	3,312	14,650	26,847	30,854	3,357	15,113	27,550	32,100	33,200										
42	3,164	13,285	24,226	27,885	3,199	13,603	24,953	29,089	30,082										
44	3,030	12,102	21,954	25,312	3,064	12,393	22,618	26,411	27,323										
46	2,908	11,070	19,974	23,066	2,940	11,337	20,582	24,675	24,914										
48	2,796	10,165	18,237	21,095	2,827	10,411	18,797	22,024	22,801										
50	2,694	9,367	16,705	19,355	2,723	9,594	17,222	20,215	20,934										
52	2,599	8,659	15,347	17,811	2,628	8,870	15,827	18,609	19,280										
54	2,513	8,028	14,346	16,435	2,540	8,225	14,585	17,178	17,805										
56	2,432	7,465	13,058	15,203	2,459	7,648	13,475	15,898	16,466										
58	2,358	6,958	12,069	14,096	2,384	7,130	12,478	14,747	15,299										
60	2,289	6,502	11,216	13,098	2,314	6,663	11,581	13,709	14,229										
62	2,224	6,090	10,426	12,195	2,248	6,241	10,770	12,770	13,262										
64	2,164	5,716	9,711	11,373	2,187	5,858	10,035	11,917	12,363										
66	2,108	5,375	9,061	10,625	2,131	5,510	9,366	11,140	11,532										

$\frac{2 \Delta f_n}{f_*} \cdot \%$	$n = 7$				$n = 8$			
	$q_1 = q_*$	$q_2 = q_1$	$q_3 = q_2$	$q_4 = q_3$	$q_1 = q_*$	$q_2 = q_*$	$q_3 = q_*$	$q_4 = q_*$
68	2,055	5,065	8,468	9,942	2,077	5,193	8,757	10,430
70	2,006	4,781	7,926	9,316	2,027	4,902	8,200	9,780
72	1,959	4,521	7,429	8,741	1,980	4,636	7,690	9,183
74	1,916	4,281	6,979	8,211	1,936	4,391	7,221	8,633
76	1,875	4,061	6,554	7,729	1,894	4,166	6,790	8,127
78	1,836	3,857	6,167	7,271	1,855	3,958	6,393	7,658
80	1,799	3,670	5,810	6,852	1,818	3,765	6,026	7,224
82	1,765	3,495	5,480	6,464	1,783	3,587	5,687	6,821
84	1,732	3,334	5,173	6,102	1,749	3,422	5,372	6,446
86	1,706	3,184	4,869	5,765	1,718	3,268	5,080	6,097
88	1,671	3,044	4,625	5,451	1,688	3,125	4,808	5,771
90	1,643	2,913	4,379	5,157	1,660	2,992	4,556	5,467
92	1,616	2,792	4,149	4,882	1,633	2,868	4,320	5,182
94	1,591	2,678	3,935	4,624	1,607	2,751	4,100	4,915
96	1,566	2,571	3,735	4,382	1,582	2,643	3,895	4,665
98	1,543	2,471	3,547	4,154	1,559	2,540	3,703	4,429
100	1,521	2,378	3,372	3,940	1,537	2,445	3,523	4,208

$\frac{2 \Delta f_n}{f_*} \cdot \%$	$n = 9$				$n = 10$			
	$q_1 = q_*$	$q_2 = q_1$	$q_3 = q_2$	$q_4 = q_3$	$q_1 = q_*$	$q_2 = q_*$	$q_3 = q_*$	$q_4 = q_*$
0,2	652,7	607425	1176186	1349498	1404560	337374	1349944	351139
0,4	326,3	151856	294046	130687	156062	84333	53980	87785
0,6	217,6	67492	130687	73512	47047	32672	37486	56182
0,8	163,2	37964	24967	12396	24004	18378	27541	39015
1,0	130,5	130,5	108,78	168,3	1674,92	14521	21086	28664
1,2	93,24	949,0	949,0	735,12	11762	14521	16661	21946
1,4	81,59	7499,1	7499,1	7499,1	2940,5	2940,5	13495	17340
1,6	72,52	6074,2	6074,2	6074,2	1306,9	1306,9	13495	14046
1,8	65,270	242,92	242,92	242,92	470,47	470,47	3373,7	3511,4
2,0	32,644	1518,56	1518,56	1518,56	326,72	328,36	1499,4	1560,6
2,2	21,771	674,92	674,92	674,92	182,32	182,32	843,44	877,85
2,4	16,337	379,64	379,64	379,64	735,12	735,12	539,80	561,82
2,6	13,079	242,92	242,92	242,92	326,72	326,72	374,86	390,16
2,8	10,908	168,68	168,68	168,68	238,36	238,36	275,41	286,64
3,0	9,359	123,92	123,92	123,92	182,32	182,32	210,86	219,46
3,2	8,198	94,865	94,865	94,865	143,77	143,77	166,60	173,40
3,4	7,297	74,947	74,947	74,947	60,699	60,699	134,95	140,46
3,6	6,576	50,159	50,159	50,159	95,780	95,780	111,53	116,08
3,8	5,988	42,141	42,141	42,141	80,262	80,262	93,715	97,039
4,0	5,499	35,903	35,903	35,903	68,185	68,185	79,852	83,110
4,2	5,085	30,952	30,952	30,952	58,602	58,602	68,930	70,922
4,4	4,731	26,959	26,959	26,959	50,872	50,872	59,019	61,652
4,6	4,426	23,782	23,782	23,782	45,088	45,088	52,715	53,648

$\frac{2 \Delta f_{\text{II}}}{f_0} \cdot \%$	$q_1 = q_{10}$	$q_2 = q_8$	$q_4 = q_6$	$q_4 = q_7$	$q_6 = q_4$
34	3,924	20,984	39,305	45,721	47,218
36	3,715	18,714	34,914	40,689	42,436
38	3,529	16,794	31,199	36,414	37,971
40	3,362	15,155	28,028	32,768	34,159
42	3,212	13,745	25,300	29,630	30,941
44	3,075	12,523	22,936	26,909	28,122
46	2,951	11,451	20,876	24,536	25,671
48	2,838	10,522	19,068	22,451	23,500
50	2,734	9,698	17,475	20,418	21,590
52	2,668	8,966	16,062	18,980	19,893
54	2,550	8,315	14,805	17,526	18,382
56	2,468	7,733	13,680	16,225	17,028
58	2,393	7,210	12,672	15,055	15,812
60	2,222	6,739	11,763	14,001	14,716
62	2,251	6,313	10,942	13,046	13,723
64	2,196	5,926	10,198	12,179	12,823
66	2,139	5,575	9,521	11,389	12,001

$\frac{2 \Delta f_{\text{II}}}{f_0} \cdot \%$	$q_1 = q_{10}$	$q_2 = q_8$	$q_4 = q_6$	$q_4 = q_7$	$q_6 = q_4$
68	2,087	5,268	8,931	10,699	11,283
70	2,035	4,961	8,340	10,008	10,564
72	1,988	4,692	7,824	9,401	9,933
74	1,944	4,445	7,348	8,843	9,353
76	1,902	4,217	6,913	8,328	8,817
78	1,863	4,007	6,511	7,852	8,321
80	1,825	3,813	6,140	7,411	7,862
82	1,790	3,633	5,796	7,002	7,436
84	1,757	3,467	5,478	6,621	7,039
86	1,725	3,312	5,182	6,267	6,670
88	1,695	3,167	4,907	5,936	6,324
90	1,668	3,033	4,651	5,628	6,001
92	1,639	2,907	4,413	5,338	5,699
94	1,614	2,794	4,198	5,076	5,424
96	1,589	2,680	3,982	4,814	5,149
98	1,566	2,577	3,788	4,575	4,898
100	1,544	2,484	3,637	4,357	4,668

Прототипный ступенчатый переход с чебышевской характеристикой

|Г|_{макс} = 0,3

$\frac{2 \Delta f_{\Pi}}{f_s}$, %	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		
	$q_1 = q_*$	q_2	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_3$	$q_1 = q_6$	$q_2 = q_5$	$q_3 = q_4$
0,2	833,56	374123	955,89	679122	1003,0	778784	1119552
0,4	416,78	93530	477,94	169780	501,53	194696	276888
0,6	277,85	41569	318,63	75458	334,35	88531	124394
0,8	208,39	23383	238,97	42445	250,76	48674	69972
1,0	166,71	14965	191,18	27165	200,61	31151	44782
1,2	138,93	10392	159,31	18864	167,17	21633	31098
1,4	119,08	7935	136,56	13859	143,29	15893	22848
1,6	104,20	5845	110,49	10611	125,38	12168	17493
1,8	92,618	4618	106,21	8384,2	111,45	9614,6	13822
2,0	83,356	3741,2	95,589	6791,2	100,31	7787,8	11195
4	41,671	935,04	47,797	1697,20	51,367	1982,8	2820,4
6	27,778	415,50	31,868	753,99	34,249	881,04	1252,5
8	20,831	233,66	23,905	423,87	25,691	495,44	703,91
10	16,662	149,49	19,128	271,07	20,557	316,96	449,95
12	13,882	103,77	15,944	188,07	17,136	220,01	312,01
14	11,896	76,201	13,670	138,02	14,692	161,55	228,82
16	10,406	58,310	11,965	105,54	12,860	123,60	174,84
18	9,247	46,045	10,640	83,275	97,591	137,83	

Продолжение табл. 9.2

$\frac{2 \Delta f_{\Pi}}{f_s}$, %	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		
	$q_1 = q_*$	q_2	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_3$	$q_1 = q_6$	$q_2 = q_5$	$q_3 = q_4$
20	8,320	37,272	9,579	67,346	10,297	78,984	111,35
22	7,561	30,783	8,712	55,561	9,366	65,217	91,765
24	6,928	25,849	7,990	46,598	8,590	54,747	76,869
26	6,393	22,010	7,380	39,622	7,934	46,598	65,277
28	5,935	18,965	6,856	34,088	7,372	40,132	56,079
30	5,537	16,509	6,403	29,624	6,885	34,916	48,661
32	5,189	14,501	6,006	25,971	6,460	30,646	42,559
34	4,883	12,837	5,657	22,949	6,085	27,108	37,359
36	4,610	11,445	5,346	20,407	5,751	24,143	33,344
38	4,367	10,267	5,068	18,261	5,453	21,634	29,778
40	4,148	9,263	4,819	16,429	5,185	19,492	26,735
42	3,950	8,400	4,593	14,853	4,943	17,648	24,116
44	3,770	7,654	4,388	13,487	4,723	16,050	21,847
46	3,606	7,003	4,200	12,296	4,522	14,656	19,869
48	3,457	6,434	4,029	11,252	4,338	13,432	18,134
50	3,319	5,932	3,871	10,830	4,170	12,353	16,603
52	3,193	5,489	3,725	9,514	4,014	11,395	15,247
54	3,076	5,095	3,590	8,787	3,870	10,542	14,040
56	2,968	4,744	3,465	8,137	3,736	9,779	12,960
58	2,868	4,429	3,349	7,554	3,612	9,094	11,991
60	2,775	4,147	3,241	7,028	3,496	8,475	11,119
62	2,689	3,893	3,139	6,563	3,387	7,916	10,330
64	2,608	3,663	3,044	6,123	3,286	7,409	9,615

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0}$, %	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1 = q_*$	q_1	$q_1 = q_*$	$q_1 - q_*$	$q_1 = q_*$	$q_1 - q_*$
66	2,533	3,455	2,955	5,732	3,191	6,946
68	2,463	3,266	2,871	5,375	3,101	6,525
70	2,397	3,094	2,792	5,050	3,017	6,138
72	2,335	2,937	2,717	4,751	2,937	5,784
74	2,278	2,794	2,647	4,478	2,862	5,458
76	2,224	2,662	2,580	4,226	2,791	5,158
78	2,173	2,542	2,517	3,994	2,723	4,880
80	2,125	2,432	2,457	3,780	2,659	4,623
82	2,080	2,330	2,400	3,583	2,598	4,385
84	2,038	2,236	2,346	3,400	2,540	4,164
86	1,998	2,150	2,294	3,231	2,485	3,958
88	1,961	2,070	2,245	3,073	2,432	3,766
90	1,926	1,997	2,198	2,927	2,382	3,587
92	1,892	1,928	2,154	2,792	2,384	3,420
94	1,861	1,865	2,111	2,666	2,288	3,263
96	1,832	1,806	2,070	2,548	2,244	3,116
98	1,804	1,752	2,032	2,439	2,201	2,979
100	1,777	1,701	1,995	2,337	2,161	2,880

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0}$, %	$n = 5$		$n = 6$	
	$q_1 = q_*$	$q_1 - q_*$	$q_1 = q_*$	$q_1 - q_*$
0,2	1025,7	822694	1247118	1038,3
0,4	512,86	205673	311779	519,13
0,6	341,91	91410	138568	346,09
0,8	256,43	51418	77955	259,56
1,0	205,14	32908	49884	207,65
1,2	170,95	22952	34642	173,04
1,4	146,53	16789	25451	148,32
1,6	128,21	12854	19486	129,78
1,8	113,97	10157	153956	115,36
2,0	102,57	8226,9	12471	103,83
4	51,286	2056,7	3117,8	51,913
6	34,198	914,10	1385,7	34,609
8	25,654	514,18	779,45	25,956
10	20,528	329,08	498,85	20,920
12	17,112	228,53	346,42	17,391
14	14,673	167,60	240,19	14,970
16	12,844	128,27	189,06	13,072
18	11,422	101,30	150,93	11,614

$\frac{2 \Delta f_{11}}{f_0} \cdot \%$	$n = 5$			$n = 6$		
	$q_1 = q_6$	$q_2 = q_5$	$q_3 = q_4$	$q_1 = q_7$	$q_2 = q_8$	$q_3 = q_9$
20	10,285	82,004	122,72	10,412	84,353	128,98
22	9,356	67,728	101,48	9,4708	69,673	106,40
24	8,582	56,870	85,195	8,6872	58,508	89,218
26	7,949	48,544	72,464	8,0246	49,819	75,848
28	7,366	41,715	62,350	7,457	42,924	65,241
30	6,881	36,305	54,272	6,966	37,862	56,684
32	6,456	31,878	47,474	6,535	32,894	49,751
34	6,082	28,210	41,919	6,257	29,038	43,878
36	5,749	25,135	37,262	5,820	25,878	39,014
38	5,552	22,594	33,321	5,520	23,202	34,999
40	5,185	20,312	29,955	5,250	20,919	31,384
42	4,944	18,401	27,059	5,005	18,954	28,362
44	4,725	16,744	24,549	4,784	17,251	25,743
46	4,525	15,299	22,359	4,581	15,765	23,458
48	4,342	14,031	20,437	4,396	14,462	21,452
50	4,176	12,912	18,742	4,226	13,311	19,683
52	4,018	11,920	17,238	4,069	12,292	18,115
54	3,875	11,086	15,899	3,924	11,382	16,718
56	3,742	10,245	14,701	3,790	10,570	15,468
58	3,618	9,535	13,625	3,664	9,840	14,346
60	3,503	8,895	12,655	3,548	9,182	13,534
62	3,396	8,316	11,778	3,439	8,586	12,419

$\frac{2 \Delta f_{11}}{f_0} \cdot \%$	$n = 5$			$n = 6$		
	$q_1 = q_6$	$q_2 = q_5$	$q_3 = q_4$	$q_1 = q_7$	$q_2 = q_8$	$q_3 = q_9$
64	3,295	7,790	10,981	3,337	8,046	11,589
66	3,200	7,312	10,257	3,242	7,555	10,834
68	3,111	6,875	9,596	3,152	7,106	10,144
70	3,028	6,475	8,991	3,068	6,696	9,514
72	2,949	6,108	8,436	2,988	6,318	8,934
74	2,874	5,771	7,926	2,912	5,972	8,402
76	2,804	5,460	7,456	2,842	5,653	7,912
78	2,737	5,172	7,022	2,774	5,358	7,460
80	2,674	4,906	6,620	2,711	5,085	7,041
82	2,614	4,660	6,248	2,650	4,832	6,653
84	2,557	4,431	5,903	2,592	4,597	6,293
86	2,502	4,218	5,581	2,537	4,378	5,958
88	2,450	4,019	5,282	2,484	4,174	5,646
90	2,401	3,833	5,003	2,435	3,984	5,354
92	2,354	3,670	4,743	2,388	3,806	5,082
94	2,308	3,497	4,499	2,342	3,640	4,828
96	2,265	3,345	4,271	2,298	3,484	4,589
98	2,224	3,202	4,057	2,256	3,337	4,366
100	2,184	3,067	3,857	2,216	3,199	4,156

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_e}$, %	$n = 7$						$n = 8$					
	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_7$	$q_3 = q_6$	$q_4 = q_5$	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_8$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_8$	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_8$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_8$
0,2	1045,9	859652	1330136	1426550	1050,9	868486	1347200	1453698	1476922	1453698	1476922	1476922
0,4	522,95	214913	332534	356637	525,44	217121	96498	149688	161522	161522	161522	161522
0,6	348,63	95517	147792	156505	350,30	262,72	54280	84280	90856	90856	90856	90856
0,8	261,47	53728	88133	89159	210,18	34739	53889	58147	59076	59076	59076	59076
1,0	209,18	34386	53205	57062	175,15	24124	37422	40380	41025	41025	41025	41025
1,2	174,32	23879	36948	39626	150,13	17724	27493	29667	30141	30141	30141	30141
1,4	149,41	17543	27145	29113	131,36	13570	21050	22714	23076	23076	23076	23076
1,6	130,74	13432	20783	22289	17611	116,77	10722	16632	17946	18233	18233	18233
1,8	116,21	10613	16421	14265	105,09	8684,9	13472	14537	14769	14769	14769	14769
2,0	104,59	8596,5	13301	3325,3	3566,3	52,544	2171,2	3368,0	3692,3	3692,3	3692,3	3692,3
4	52,299	2148,8	1477,9	1585,0	35,030	964,99	1496,8	1615,2	1641,9	1641,9	1641,9	1641,9
6	34,871	954,93	831,34	891,59	26,917	542,80	842,00	908,56	923,08	923,08	923,08	923,08
8	26,159	537,05	530,90	570,62	21,539	347,39	538,88	581,48	590,77	590,77	590,77	590,77
10	20,932	343,63	343,63	368,32	396,26	17,954	241,25	374,22	403,81	410,26	410,26	410,26
12	17,449	238,57	238,57	270,31	299,13	15,395	177,24	274,94	296,67	301,41	301,41	301,41
14	14,962	175,21	175,21	206,68	223,40	13,476	135,70	210,50	227,14	230,77	230,77	230,77
16	13,097	134,10	134,10	163,07	175,44	11,984	109,01	166,32	179,47	182,34	182,34	182,34
18	11,648	105,91	105,91									

Продолжение табл. 9.2

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_e}$, %	$n = 7$						$n = 8$					
	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_7$	$q_3 = q_6$	$q_4 = q_5$	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_8$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_8$	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_8$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_8$
20	10,489	85,743	131,87	141,82	10,791	88,258	134,72	145,37	145,37	145,37	145,37	145,37
22	9,541	70,824	108,79	117,01	9,816	72,901	111,38	120,14	120,14	120,14	120,14	120,14
24	8,752	59,478	91,232	98,196	9,003	61,221	93,408	100,96	100,96	100,96	100,96	100,96
26	8,084	50,647	77,569	83,543	8,316	52,131	79,425	85,921	85,921	85,921	85,921	85,921
28	7,512	43,641	66,729	71,913	7,728	44,919	68,329	73,953	75,427	75,427	75,427	75,427
30	7,017	37,989	57,983	62,531	7,218	39,101	59,379	64,314	65,299	65,299	65,299	65,299
32	6,585	33,363	50,826	54,852	6,772	34,339	52,054	56,418	57,348	57,348	57,348	57,348
34	6,203	29,529	44,895	48,89	6,379	30,393	45,983	49,877	50,705	50,705	50,705	50,705
36	5,864	26,317	39,926	43,154	6,031	26,087	40,896	44,395	45,144	45,144	45,144	45,144
38	5,561	23,598	35,720	38,591	5,719	24,288	36,592	39,755	40,414	40,414	40,414	40,414
40	5,289	21,278	32,130	34,787	5,338	21,899	32,918	35,792	36,410	36,410	36,410	36,410
42	5,043	19,281	29,040	31,469	5,185	19,844	29,756	32,384	32,943	32,943	32,943	32,943
44	4,820	17,550	26,363	28,594	4,955	18,062	27,015	29,429	29,927	29,927	29,927	29,927
46	4,616	16,040	24,028	26,085	4,745	16,508	24,605	26,850	27,315	27,315	27,315	27,315
48	4,423	14,715	21,979	23,883	4,553	15,144	22,528	24,587	25,015	25,015	25,015	25,015
50	4,258	13,546	20,171	21,940	4,376	13,941	20,678	22,589	22,990	22,990	22,990	22,990
52	4,099	12,510	18,568	20,216	4,214	12,874	19,037	20,818	21,189	21,189	21,189	21,189
54	3,954	11,587	17,140	18,680	4,063	11,924	17,576	19,239	19,587	19,587	19,587	19,587
56	3,818	10,761	15,864	17,305	3,924	11,074	16,269	17,827	18,153	18,153	18,153	18,153
58	3,693	10,019	14,717	16,070	3,794	10,310	15,096	16,864	16,864	16,864	16,864	16,864
60	3,575	9,350	13,683	14,956	3,673	9,622	14,038	15,413	15,413	15,413	15,413	15,413

16*

$\frac{2 \Delta f_{\Pi}}{f_0} \cdot \%$	$n = 7$			$n = 8$		
	$q_1 = q_8$	$q_2 = q_7$	$q_3 = q_6$	$q_4 = q_5$	$q_1 = q_9$	$q_2 = q_8$
62	3,466	8,745	12,745	13,948	3,560	8,999
64	3,368	8,197	11,900	13,032	3,554	8,434
66	3,267	7,697	11,129	12,198	3,355	7,920
68	3,177	7,241	10,424	11,437	3,262	7,451
70	3,092	6,824	9,789	10,749	3,174	7,022
72	3,011	6,441	9,189	10,099	3,092	6,628
74	2,936	6,089	8,646	9,510	3,014	6,265
76	2,864	5,765	8,145	8,966	2,940	5,932
78	2,796	5,465	7,683	8,483	2,870	5,623
80	2,732	5,188	7,256	7,998	2,804	5,338
82	2,671	4,931	6,860	7,565	2,741	5,074
84	2,613	4,693	6,492	7,163	2,681	4,828
86	2,558	4,471	6,150	6,789	2,624	4,599
88	2,506	4,264	5,831	6,440	2,570	4,386
90	2,455	4,071	5,534	6,113	2,518	4,188
92	2,408	3,890	5,256	5,808	2,469	4,002
94	2,362	3,721	4,997	5,521	2,422	3,828
96	2,318	3,563	4,754	5,252	2,377	3,666
98	2,277	3,415	4,526	4,999	2,334	3,513
100	2,236	3,275	4,312	4,761	2,292	3,369

$\frac{2 \Delta f_{\Pi}}{f_0} \cdot \%$	$n = 9$			$n = 10$		
	$q_1 = q_{10}$	$q_2 = q_9$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_7$	$q_5 = q_6$	$q_7 = q_8$
0,2	1054,3	874500	1358263	1469782	1502603	
0,4	527,20	218625	339596	367445	375651	
0,6	351,40	97167	150918	163309	166956	
0,8	263,60	54656	84891	91861	93913	
1,0	210,90	34980	54330	58791	60104	
1,2	175,70	24292	37729	40827	41739	
1,4	150,60	17847	27719	29995	30665	
1,6	131,80	13664	21223	22965	23478	
1,8	117,10	10796	16769	18145	18551	
2,0	105,43	8745,0	13583	14698	15026	
4	52,716	2186,2	3395,7	3674,4	3756,5	
6	35,144	971,67	1509,1	1633,1	1669,5	
8	26,358	546,56	848,91	918,61	939,13	
10	21,101	349,80	543,31	587,91	601,04	
12	17,590	242,68	377,30	408,27	417,39	
14	15,083	178,25	277,20	299,96	306,65	
16	13,203	136,43	212,23	229,65	234,78	
18	11,742	107,75	167,69	181,45	185,51	

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0}$, %	<i>n</i> = 9			
	$q_1 = q_{10}$	$q_2 = q_9$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_7$
20	10,573	87,241	134,42	146,98
22	9,618	72,065	111,05	150,26
24	8,822	60,522	93,150	121,47
26	8,150	51,530	79,233	102,07
28	7,373	44,412	68,172	86,969
30	7,074	38,662	59,250	74,989
32	6,638	33,987	51,944	65,324
34	6,253	30,057	45,891	57,413
36	5,912	26,789	40,817	49,806
38	5,607	24,024	36,523	44,417
40	5,332	21,663	32,857	39,822
42	5,084	19,632	29,703	35,870
44	4,859	17,871	26,969	32,471
46	4,654	16,335	24,585	29,517
48	4,466	14,988	22,493	26,939
50	4,293	13,798	20,647	24,674
52	4,132	12,739	18,975	22,673
54	3,987	11,805	17,553	20,877
56	3,850	10,965	16,249	19,319
58	3,723	10,210	15,078	17,904
60	3,605	9,530	14,023	16,631

Продолжение табл. 9.2

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0}$, %	<i>n</i> = 9			
	$q_1 = q_{10}$	$q_2 = q_9$	$q_3 = q_8$	$q_4 = q_7$
62	3,495	8,915	13,068	14,444
64	3,391	8,357	12,202	13,504
66	3,295	7,849	11,415	12,646
68	3,203	7,385	10,695	11,862
70	3,118	6,961	10,038	11,144
72	3,037	6,572	9,435	10,485
74	2,961	6,214	8,880	9,879
76	2,889	5,884	8,369	9,320
78	2,821	5,579	7,897	8,803
80	2,756	5,298	7,461	8,324
82	2,695	5,036	7,057	7,880
84	2,636	4,794	6,682	7,467
86	2,581	4,568	6,333	7,082
88	2,528	4,358	6,008	6,723
90	2,477	4,161	5,705	6,387
92	2,429	3,978	5,422	6,073
94	2,383	3,806	5,157	5,780
96	2,340	3,646	4,909	5,503
98	2,298	3,495	4,677	5,244
100	2,257	3,353	4,458	5,000

Прототипный ступенчатый переход с максимальной плоской характеристикой

 $|U|_{\max} = 0,1$

$\frac{2 \Delta f_{II}}{f_0}, \%$	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_s$	q_s	$q_1=q_s$	$q_1=q_s$	$q_1=q_s$	$q_1=q_s$
0,2	285,42	81464	295,99	17521	274,34	181704
0,4	142,71	20365	147,99	43804	137,17	45426
0,6	95,137	9051,1	98,661	19468	91,447	20199
0,8	71,361	50960,9	73,995	10950	68,585	11356
1,0	57,079	3228,0	59,195	7008,2	54,867	7267,9
1,2	47,564	2262,3	49,329	4866,6	45,722	5047,0
1,4	40,767	1661,9	42,281	3575,4	39,191	3707,9
1,6	35,669	1272,3	36,995	2737,2	34,291	2838,8
1,8	31,704	1005,2	32,884	2169,7	30,180	2242,9
2,0	28,532	814,05	29,594	1751,7	27,432	1816,7
4	14,274	203,73	14,818	437,69	13,741	454,41
6	9,518	90,595	9,895	194,33	9,180	202,04
8	7,142	51,002	7,438	109,16	6,906	113,72
10	5,717	32,684	5,968	69,739	5,546	72,832
12	4,769	22,740	4,991	48,327	4,643	50,623
14	4,093	16,752	4,295	35,418	4,001	37,232
16	3,588	12,874	3,776	27,042	3,523	28,541
18	3,197	10,222	3,374	21,302	3,154	22,583

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_{II}}{f_0}, \%$	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_s$	q_s	$q_1=q_s$	$q_1=q_s$	$q_1=q_s$	$q_1=q_s$
20	2,887	8,334	3,054	17,198	2,860	18,321
22	2,635	6,944	2,794	14,165	2,622	15,167
24	2,428	5,894	2,579	11,860	2,426	12,769
26	2,255	5,085	2,398	10,070	2,261	10,903
28	2,109	4,449	2,244	8,662	2,121	9,422
30	1,986	3,942	2,112	7,512	2,002	8,228
32	1,880	3,533	1,997	6,582	1,898	7,250
34	1,789	3,199	1,897	5,815	1,808	6,441
36	1,710	2,924	1,809	5,176	1,729	5,763
38	1,642	2,696	1,731	4,639	1,659	5,189
40	1,583	2,504	1,662	4,185	1,593	4,700
42	1,531	2,343	1,600	3,798	1,543	4,279
44	1,485	2,205	1,546	3,467	1,493	3,916
46	1,445	2,088	1,496	3,182	1,449	3,599
48	1,409	1,987	1,452	2,936	1,409	3,322
50	1,378	1,899	1,412	2,723	1,374	3,079
52	1,350	1,823	1,377	2,538	1,341	2,864
54	1,325	1,756	1,345	2,377	1,312	2,674
56	1,303	1,698	1,316	2,237	1,285	2,505
58	1,283	1,646	1,290	2,114	1,260	2,355
60	1,265	1,600	1,266	2,007	1,238	2,221

$\frac{2 \Delta f_0}{f_0}$, %	$n = 2$			$n = 3$			$n = 4$		
	$q_1 = q_3$	q_3	$q_1 = q_4$	$q_2 = q_4$	$q_1 = q_5$	$q_1 = q_6$	$q_2 = q_4$	$q_2 = q_5$	q_1
62	1,249	1,559	1,245	1,913	1,218	2,102	2,978	2,978	2,978
64	1,234	1,523	1,226	1,829	1,200	1,996	2,766	2,766	2,766
66	1,221	1,490	1,209	1,756	1,183	1,901	2,580	2,580	2,580
68	1,209	1,460	1,194	1,692	1,168	1,816	2,417	2,417	2,417
70	1,197	1,434	1,179	1,634	1,154	1,740	2,272	2,272	2,272
72	1,187	1,404	1,166	1,583	1,142	1,672	2,145	2,145	2,145
74	1,178	1,387	1,156	1,538	1,130	1,612	2,033	2,033	2,033
76	1,169	1,367	1,145	1,498	1,120	1,558	1,934	1,934	1,934
78	1,162	1,349	1,136	1,462	1,111	1,509	1,846	1,846	1,846
80	1,154	1,332	1,127	1,429	1,102	1,466	1,769	1,769	1,769
82	1,148	1,317	1,119	1,400	1,094	1,427	1,701	1,701	1,701
84	1,141	1,303	1,112	1,374	1,088	1,393	1,640	1,640	1,640
86	1,136	1,289	1,106	1,350	1,081	1,362	1,586	1,586	1,586
88	1,130	1,277	1,099	1,328	1,076	1,334	1,538	1,538	1,538
90	1,125	1,266	1,094	1,309	1,070	1,309	1,496	1,496	1,496
92	1,121	1,256	1,089	1,291	1,066	1,286	1,458	1,458	1,458
94	1,116	1,246	1,084	1,275	1,061	1,266	1,424	1,424	1,424
96	1,112	1,237	1,080	1,260	1,057	1,248	1,383	1,383	1,383
98	1,108	1,229	1,076	1,247	1,054	1,231	1,366	1,366	1,366
100	1,105	1,221	1,073	1,234	1,050	1,216	1,341	1,341	1,341

$\frac{2 \Delta I_D}{I_0}$, %	$n = 5$			$n = 6$			$n = 7$		
	$q_1 = q_3$	q_3	$q_1 = q_5$	$q_2 = q_4$	$q_1 = q_7$	$q_2 = q_4$	$q_1 = q_6$	$q_2 = q_5$	q_1
0,2	248,50	161671	523179	224,70	137941	514805	703237	703237	703237
0,4	124,25	40417	130794	112,35	34485	129701	175809	175809	175809
0,6	82,833	17963	58,30	74,899	15326	57200	78136	78136	78136
0,8	62,125	10104	32698	56,174	8621,2	32174	43951	43951	43951
1,0	49,699	6466,6	20929	44,939	5517,5	320591	28128	28128	28128
1,2	41,416	4490,6	14532	37,449	3831,1	14299	19533	19533	19533
1,4	35,499	3299,2	10676	32,099	285,0	10509	14351	14351	14351
1,6	31,062	2525,9	8174,0	28,087	2155,2	8043,3	10987	10987	10987
1,8	27,609	1995,7	6458,3	24,966	1702,8	6355,1	8681,3	8681,3	8681,3
2,0	24,849	1616,5	5231,1	22,499	1379,2	5147,5	7031,7	7031,7	7031,7
2,2	12,422	403,98	1307,3	11,232	344,72	1286,5	1757,4	1757,4	1757,4
2,4	8,324	179,92	576,09	7,4868	153,13	571,51	780,71	780,71	780,71
2,6	6,266	101,33	324,09	5,677	86,561	3,18,98	438,12	438,12	438,12
2,8	5,037	64,959	206,58	4,569	55,526	203,17	279,43	279,43	279,43
3,0	4,222	45,200	142,68	3,835	38,668	140,28	193,53	193,53	193,53
3,2	3,644	33,287	104,15	3,315	28,504	102,37	141,69	141,69	141,69
3,4	3,213	25,555	79,153	2,928	21,908	77,776	108,05	108,05	108,05
3,6	2,881	20,355	62,021	2,630	17,387	60,931	84,966	84,966	84,966

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$n = 5$				$n = 6$			
	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_3=q_4$	$q_1=q_7$	$q_2=q_6$	$q_3=q_6$	q_4	
20	2,618	16,465	49,775	2,395	14,154	48,895	68,467	
22	2,405	13,661	40,724	2,205	11,762	40,003	56,250	
24	2,230	11,559	33,848	2,049	9,945	33,253	46,954	
26	2,083	9,871	28,506	1,919	8,531	28,011	39,716	
28	1,959	8,556	24,275	1,810	7,410	23,864	33,971	
30	1,853	7,496	20,870	1,717	6,507	20,530	29,333	
32	1,762	6,628	18,091	1,637	5,768	17,811	25,535	
34	1,683	5,910	15,796	1,567	5,157	15,568	22,386	
36	1,614	5,309	13,880	1,507	4,646	13,698	19,745	
38	1,553	4,801	12,265	1,455	4,214	12,124	17,599	
40	1,500	4,368	10,893	1,408	3,847	10,789	15,600	
42	1,452	3,995	9,719	1,368	3,531	9,647	13,957	
44	1,410	3,673	8,708	1,331	3,258	8,665	12,533	
46	1,372	3,393	7,831	1,299	3,021	7,814	11,292	
48	1,338	3,147	7,068	1,270	2,814	7,074	10,203	
50	1,307	2,931	6,400	1,245	2,631	6,427	9,244	
52	1,280	2,740	5,814	1,222	2,471	5,858	8,396	
54	1,255	2,570	5,297	1,201	2,328	5,357	7,642	
56	1,223	2,419	4,839	1,183	2,201	4,913	6,970	
58	1,213	2,284	4,433	1,166	2,088	4,518	6,369	
60	1,194	2,163	4,073	1,151	1,986	4,167	5,831	

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$n = 5$				$n = 6$			
	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_3=q_4$	$q_1=q_7$	$q_2=q_6$	$q_3=q_6$	q_4	
62	1,177	2,053	3,752	1,137	1,895	3,853	5,347	
64	1,162	1,955	3,465	1,125	1,813	3,571	4,912	
66	1,148	1,866	3,210	1,114	1,738	3,319	4,520	
68	1,135	1,786	2,981	1,104	1,671	3,091	4,167	
70	1,124	1,714	2,777	1,094	1,610	2,887	3,848	
72	1,113	1,648	2,695	1,086	1,555	2,702	3,560	
74	1,104	1,589	2,632	1,078	1,505	2,535	3,300	
76	1,095	1,535	2,586	1,071	1,459	2,385	3,065	
78	1,087	1,487	2,57	1,065	1,418	2,249	2,853	
80	1,079	1,443	2,041	1,059	1,380	2,126	2,663	
82	1,073	1,403	1,938	1,054	1,346	2,015	2,492	
84	1,067	1,368	1,847	1,049	1,314	1,916	2,338	
86	1,061	1,335	1,766	1,045	1,286	1,826	2,201	
88	1,056	1,307	1,694	1,041	1,260	1,745	2,078	
90	1,052	1,281	1,630	1,037	1,237	1,673	1,968	
92	1,047	1,257	1,573	1,034	1,216	1,608	1,871	
94	1,044	1,236	1,522	1,031	1,197	1,550	1,784	
96	1,040	1,217	1,477	1,028	1,179	1,498	1,707	
98	1,038	1,200	1,437	1,026	1,164	1,452	1,639	
100	1,035	1,185	1,401	1,024	1,150	1,411	1,578	

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_b}$, %	$n = 7$				$n = 8$			
	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_3$	$q_2=q_4$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_3$	$q_2=q_4$
0,2	204,04	116662	472355	757599	186,38	98932	421649	744365
0,4	102,016	29165	118088	189399	93,194	24733	105412	186091
0,6	68,016	12962	52483	84177	62,129	10992	46849	82706
0,8	51,012	7291,2	29521	47349	46,597	6183,2	26352	46522
1,0	40,809	4666,3	18893	30303	37,277	3957,2	16865	29774
1,2	34,008	3240,5	13120	21043	31,064	2748,0	11712	20676
1,4	29,149	2380,7	9659,5	15460	26,626	2018,9	8804,8	24389
1,6	25,506	1822,7	7380,1	11836	23,298	1543,7	6588,0	15190
1,8	22,671	1440,1	5831,1	9352,5	20,709	1221,3	5205,2	11630
2,0	20,404	1166,5	4723,1	7575,4	18,638	989,26	4216,2	9189,0
4	10,200	291,56	1180,5	1893,4	9,318	247,27	1053,8	7443,2
6	6,799	129,53	524,47	841,19	6,211	109,86	468,23	1860,4
8	5,098	72,824	294,86	472,92	4,657	61,770	263,26	826,60
10	4,164	47,042	186,07	301,41	3,725	39,510	168,39	464,75
12	3,500	32,786	128,37	208,72	3,102	27,418	116,85	297,27
14	3,030	24,190	93,601	152,92	2,789	20,588	83,171	206,29
16	2,682	18,613	71,051	116,66	2,473	15,859	63,056	150,16
18	2,414	14,790	55,556	91,807	2,232	12,618	49,287	179,49
								136,14
								106,89

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_b}$, %	$n = 7$				$n = 8$			
	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_3$	$q_2=q_4$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_3$	$q_2=q_4$
20	2,204	12,056	44,579	74,026	2,042	10,300	39,460	72,676
22	2,034	10,035	36,436	60,867	1,890	8,588	32,208	59,748
24	1,895	8,499	30,259	50,855	1,765	7,286	26,713	49,910
26	1,779	7,304	25,467	43,062	1,662	6,275	22,454	42,252
28	1,682	6,358	21,679	36,875	1,576	5,473	19,092	39,174
30	1,600	5,595	18,637	31,882	1,503	4,828	16,395	31,268
32	1,530	4,972	16,160	27,783	1,442	4,301	14,202	27,251
34	1,469	4,457	14,120	24,403	1,389	3,866	12,399	23,922
36	1,417	4,026	12,420	21,561	1,343	3,502	10,901	21,131
38	1,371	3,663	10,994	19,154	1,303	3,196	9,644	18,769
40	1,331	3,353	9,788	17,099	1,269	2,935	8,582	16,752
42	1,296	3,088	8,753	15,329	1,239	2,712	7,678	15,018
44	1,266	2,859	7,869	13,796	1,212	2,520	6,903	13,515
46	1,238	2,660	7,100	12,458	1,189	2,353	6,236	12,206
48	1,214	2,487	6,439	11,285	1,169	2,208	5,657	11,058
50	1,193	2,335	5,865	10,250	1,151	2,080	5,154	10,048
52	1,174	2,207	5,355	9,333	1,135	1,969	4,714	9,154
54	1,156	2,082	4,900	8,518	1,121	1,870	4,327	8,360
56	1,141	1,977	4,510	7,790	1,108	1,783	3,987	7,652
58	1,127	1,883	4,160	7,137	1,097	1,705	3,686	7,018
60	1,115	1,799	3,849	6,551	1,087	1,636	3,419	6,451
								8,065

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0}$, %	$n = 7$				$n = 8$			
	$q_1=q_8$	$q_1=q_7$	$q_1=q_6$	$q_1=q_5$	$q_1=q_4$	$q_1=q_3$	$q_1=q_2$	$q_1=q_1$
62	1,104	1,724	3,571	6,023	1,078	1,574	3,181	5,940
64	1,084	1,657	3,323	5,546	1,070	1,519	2,969	5,480
66	1,085	1,596	3,100	5,115	1,063	1,470	2,780	5,064
68	1,077	1,541	2,899	4,724	1,057	1,425	2,605	4,687
70	1,070	1,492	2,719	4,369	1,051	1,385	2,435	4,345
72	1,063	1,447	2,556	4,016	1,046	1,349	2,319	4,048
74	1,058	1,406	2,409	3,753	1,041	1,316	2,196	3,752
76	1,052	1,369	2,276	3,486	1,037	1,287	2,083	3,496
78	1,047	1,336	2,155	3,243	1,034	1,260	1,982	3,261
80	1,042	1,305	2,045	3,022	1,030	1,236	1,890	3,047
82	1,038	1,277	1,946	2,822	1,027	1,214	1,806	2,883
84	1,035	1,252	1,855	2,639	1,025	1,194	1,730	2,675
86	1,032	1,229	1,773	2,474	1,022	1,176	1,661	2,512
88	1,029	1,208	1,698	2,324	1,020	1,159	1,599	2,364
90	1,026	1,189	1,631	2,189	1,018	1,144	1,541	2,229
92	1,024	1,171	1,570	2,067	1,016	1,130	1,490	2,107
94	1,0217	1,155	1,515	1,957	1,015	1,118	1,442	1,995
96	1,0197	1,141	1,465	1,859	1,013	1,107	1,399	1,894
98	1,0178	1,128	1,420	1,772	1,012	1,097	1,361	1,803
100	1,0162	1,166	1,380	1,693	1,009	1,087	1,326	1,721

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0}$, %	$n = 9$				$n = 10$			
	$q_1=q_{10}$	$q_1=q_9$	$q_1=q_8$	$q_1=q_7$	$q_1=q_6$	$q_1=q_5$	$q_1=q_4$	$q_1=q_3$
0,2	171,280	84474	372655	70362	914250	228564		
0,4	85,640	21118	93163	175090				
0,6	57,090	93885	4405	7787	101583			
0,8	42,820	5279	23290	43772	57140			
1,0	34,250	3378	14906	28014	36569			
1,2	28,540	2346	10351	19454	25395			
1,4	24,460	1723	7605	14292	18657			
1,6	21,410	1319	5892	10942	14284			
1,8	19,030	1042	4600	8646	11286			
2,0	17,120	844,0	3726	7003	9142			
2,4	8,563	211,14	931,43	1750,5	2285,1			
6	5,708	938,14	413,86	777,80				
8	4,280	52,750	232,70	437,34				
10	3,423	33,743	148,86	279,76				
12	2,972	23,864	100,52	194,16				
14	2,584	17,647	73,114	140,93				
16	2,297	13,610	55,354	107,58				
18	2,078	10,843	43,203	84,64				

$\frac{2 \Delta f_{\Pi}}{f_o}$, %	$n = 9$			
	$q_1=q_4$	$q_1=q_3$	$q_3=q_4$	$q_4=q_1$
20	1,906	8,866	34,537	68,210
22	1,768	7,405	28,169	55,866
24	1,657	6,295	23,310	46,787
26	1,565	5,432	19,566	39,580
28	1,488	4,750	16,615	33,860
30	1,423	4,200	14,251	29,243
32	1,369	3,752	12,333	25,464
34	1,322	3,382	10,758	22,331
36	1,282	3,073	9,452	19,707
38	1,248	2,813	8,359	17,486
40	1,218	2,592	7,437	15,592
42	1,192	2,404	6,654	13,963
44	1,170	2,241	5,985	12,554
46	1,150	2,101	5,409	11,327
48	1,133	1,972	4,912	10,254
50	1,120	1,872	4,480	9,309
52	1,105	1,779	4,103	8,476
54	1,093	1,697	3,773	7,737
56	1,083	1,624	3,484	7,079
58	1,074	1,560	3,228	6,493
60	1,066	1,502	3,002	5,968

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_{\Pi}}{f_o}$, %	$n = 9$			
	$q_1=q_4$	$q_1=q_3$	$q_3=q_4$	$q_4=q_1$
62	1,058	1,452	2,801	5,497
64	1,052	1,406	2,623	5,074
66	1,046	1,366	2,464	4,693
68	1,042	1,330	2,321	4,349
70	1,037	1,297	2,194	4,038
72	1,033	1,268	2,073	3,757
74	1,030	1,242	1,976	3,502
76	1,027	1,218	1,884	3,270
78	1,024	1,197	1,800	3,059
80	1,021	1,178	1,724	2,867
82	1,019	1,161	1,656	2,693
84	1,017	1,145	1,594	2,534
86	1,015	1,131	1,537	2,388
88	1,014	1,119	1,486	2,256
90	1,012	1,107	1,440	2,135
92	1,011	1,096	1,398	2,025
94	1,010	1,087	1,359	1,924
96	1,009	1,078	1,324	1,833
98	1,008	1,071	1,293	1,749
100	1,007	1,064	1,264	1,674

$n = 10$

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$q_1=q_{11}$	$q_2=q_{10}$	$q_3=q_9$	$q_4=q_8$	$q_5=q_7$	$q_6=q_6$	$q_7=q_5$	$q_8=q_4$	$q_9=q_3$	$q_{10}=q_2$	$q_{11}=q_1$
0,2	158,293	72717	328691	645093	901068	225267	225267	998843	998843	249710	249710
0,4	79,146	18179,2	82172	161273	100118	100118	100118	110982	110982	62427	62427
0,6	52,764	8079,6	36521	7,677	56316	36042	36042	39953	39953	2496,6	2496,6
0,8	39,573	4544,7	20543	1347,5	22803	25029	25029	27745	27745	1109,9	1109,9
1,0	31,658	2908,6	9130,1	17918	13164	18389	18389	20384	20384	15606	15606
1,2	26,382	2019,8	6707,8	10079	14079	11124	11124	12331	12331	9010,3	9010,3
1,4	22,613	1488,9	5135,6	10079	14079	11124	11124	12331	12331	9987,9	9987,9
1,6	19,786	1136,1	897,71	4057,7	7963,8	6450,6	6450,6	7000,3	7000,3	2496,6	2496,6
1,8	17,588	4057,7	72713	3286,7	9010,3	2252,2	2252,2	2496,6	2496,6	1109,9	1109,9
2,0	15,829	72713	18176	82157	1612,4	1000,7	1000,7	1109,9	1109,9	623,79	623,79
4	7,914	18176	80762	365,05	716,6	402,87	402,87	562,73	562,73	359,99	359,99
6	5,275	45413	205,27	131,32	257,73	257,73	257,73	276,98	276,98	249,86	249,86
8	3,956	29,052	91,145	178,88	66,921	131,34	131,34	183,46	183,46	203,36	203,36
10	3,164	20,164	66,921	51,199	100,48	100,48	100,48	155,39	155,39	140,36	140,36
12	2,652	14,805	11,327	9,346	37,136	76,923	76,923	105,70	105,70	120,48	120,48
14	2,336	2,114	1,934								
16											
18											

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$q_1=q_{11}$	$q_2=q_{10}$	$q_3=q_9$	$q_4=q_8$	$q_5=q_7$	$q_6=q_6$	$q_7=q_5$	$q_8=q_4$	$q_9=q_3$	$q_{10}=q_2$	$q_{11}=q_1$
20	1,791	7,698	30,138	62,610	88,738	88,738	88,738	96,280	96,280	80,139	80,139
22	1,666	6,442	24,523	51,400	73,056	73,056	73,056	61,151	61,151	67,586	67,586
24	1,566	5,487	20,278	42,871	51,883	51,883	51,883	57,536	57,536	49,588	49,588
26	1,483	4,746	16,997	36,231	44,523	44,523	44,523	43,051	43,051	38,598	38,598
28	1,414	4,160	14,414	30,961	36,708	36,708	36,708	37,677	37,677	33,254	33,254
30	1,357	3,689	12,349	26,708	33,731	33,731	33,731	29,700	29,700	29,498	29,498
32	1,309	3,305	10,677	23,228	30,313	30,313	30,313	26,324	26,324	26,331	26,331
34	1,268	2,988	9,307	17,928	21,020	21,020	21,020	23,627	23,627	21,299	21,299
36	1,233	2,724	8,173	15,885	19,495	19,495	19,495	17,516	17,516	19,280	19,280
38	1,203	2,502	7,226	14,144	18,094	18,094	18,094	15,967	15,967	14,598	14,598
40	1,177	2,314	6,429	12,649	18,856	18,856	18,856	17,383	17,383	12,298	12,298
42	1,155	2,154	5,755	11,356	17,089	17,089	17,089	15,900	15,900	11,326	11,326
44	1,136	2,016	5,179	10,232	15,495	15,495	15,495	10,451	10,451	9,900	9,900
46	1,119	1,897	4,685	9,250	14,094	14,094	14,094	9,112	9,112	8,401	8,401
48	1,105	1,794	4,259	8,389	12,856	12,856	12,856	8,409	8,409	9,660	9,660
50	1,092	1,704	3,890	7,629	11,758	11,758	11,758	10,778	10,778	12,298	12,298
52	1,081	1,626	3,570	6,958	10,778	10,778	10,778	9,900	9,900	11,326	11,326
54	1,072	1,557	3,290	6,362	9,900	9,900	9,900	9,451	9,451	10,451	10,451
56	1,063	1,496	3,044	5,831	8,409	8,409	8,409	8,409	8,409	9,660	9,660
58	1,056	1,443	2,828	5,358							
60	1,049	1,396	2,637								

$n = 10$

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0} \cdot \%$	$q_1 = q_{11}$	$q_2 = q_{10}$	$q_3 = q_9$	$q_4 = q_8$	$q_5 = q_7$	$q_6 = q_6$	$q_7 = q_5$
62	1,044	1,354	2,469	4,936	7,757	8,943	
64	1,039	1,317	2,319	4,557	7,173	8,290	
66	1,034	1,284	2,186	4,217	6,642	7,695	
68	1,030	1,254	2,068	3,911	6,158	7,150	
70	1,027	1,228	1,962	3,636	5,716	6,650	
72	1,024	1,205	1,867	3,387	5,311	6,189	
74	1,021	1,184	1,782	3,163	4,939	5,765	
76	1,019	1,165	1,706	2,960	4,599	5,373	
78	1,017	1,148	1,637	2,776	4,286	5,010	
80	1,015	1,133	1,575	2,609	3,998	4,674	
82	1,013	1,120	1,520	2,458	3,733	4,363	
84	1,012	1,108	1,469	2,321	3,489	4,073	
86	1,0105	1,097	1,424	2,196	3,264	3,805	
88	1,009	1,087	1,383	2,082	3,057	3,555	
90	1,008	1,078	1,346	1,979	2,866	3,324	
92	1,0074	1,070	1,312	1,885	2,690	3,109	
94	1,0066	1,063	1,281	1,799	2,528	2,910	
96	1,0059	1,057	1,254	1,721	2,380	2,726	
98	1,0053	1,051	1,229	1,649	2,243	2,555	
100	1,0047	1,046	1,206	1,584	2,118	2,399	

 $n = 11$

$\frac{2 \Delta f_{\pi}}{f_0} \cdot \%$	$q_1 = q_{11}$	$q_2 = q_{11}$	$q_3 = q_{10}$	$q_4 = q_9$	$q_5 = q_8$	$q_6 = q_7$	$q_7 = q_6$
0,2	147,04	63114	290422	588131	861723	1024332	
0,4	73,520	15778	72605	147032	215430	256082	
0,6	49,010	7012,0	32269	65347	95746	113814	
0,8	36,760	3944,0	18151	36758	53857	64020	
1,0	29,409	2524,0	11616	23525	34468	40972	
1,2	24,507	1753,0	8067,0	16336	23936	28453	
1,4	21,000	1298,0	5926,0	12002	17585	20904	
1,6	18,380	986,00	4637,0	9189,0	13464	16004	
1,8	16,330	779,00	3585,0	7260,0	10638	12645	
2,0	14,700	631,00	2904,0	5881,0	8616,0	10242	
2,4	7,352	157,76	725,93	1470,1	2153,9	2560,4	
6	4,901	70,101	322,57	653,23	957,10	1137,7	
8	3,675	39,420	181,39	367,33	538,21	639,77	
10	2,939	25,219	116,05	235,00	344,32	409,79	
12	2,598	17,505	80,548	163,12	239,00	284,10	
14	2,262	13,140	59,145	119,77	175,49	208,61	
16	2,020	10,246	45,254	91,643	134,27	159,61	
18	1,835	8,219	35,729	72,356	106,01	126,02	

$n = 11$

$\frac{2 \Delta f_{11}}{f_0}$, %	$q_1=q_{12}$	$q_2=q_{11}$	$q_3=q_{10}$	$q_4=q_9$	$q_5=q_8$	$q_6=q_7$
20	1,692	6,744	28,917	58,559	85,800	101,99
22	1,580	5,654	23,876	48,351	70,844	84,212
24	1,488	4,828	20,042	40,587	59,468	70,689
26	1,414	4,186	17,058	34,544	50,614	60,165
28	1,353	3,680	14,691	29,750	43,589	51,814
30	1,302	3,272	10,715	24,101	36,79	44,254
32	1,259	2,940	9,257	20,929	32,144	38,776
34	1,223	2,667	8,065	18,302	28,293	34,149
36	1,192	2,440	7,080	16,102	25,060	30,325
38	1,166	2,249	6,260	14,244	22,324	27,070
40	1,144	2,088	5,572	12,661	19,986	24,304
42	1,125	1,962	4,990	11,304	17,971	21,919
44	1,108	1,834	4,496	10,132	16,223	19,849
46	1,094	1,732	4,072	9,116	14,697	18,042
48	1,082	1,646	3,708	8,230	13,356	16,454
50	1,072	1,570	3,394	7,453	12,172	15,051
52	1,062	1,505	3,120	6,770	11,122	13,806
54	1,055	1,446	2,882	6,168	10,186	12,695
56	1,048	1,395	2,674	5,536	9,38	11,699
58	1,042	1,350	2,492	5,164	8,595	10,804
60	1,036	1,311	2,332	4,744	7,917	9,994

Продолжение табл. 9.3

$\frac{2 \Delta f_{11}}{f_0}$, %	$q_1=q_{12}$	$q_2=q_{11}$	$q_3=q_{10}$	$q_4=q_9$	$q_5=q_8$	$q_6=q_7$
62	1,0324	1,2768	2,190	4,370	7,304	9,260
64	1,0285	1,2463	2,065	4,036	6,749	8,594
66	1,0250	1,2183	1,954	3,736	6,245	7,984
68	1,0220	1,1960	1,855	3,460	5,775	7,440
70	1,0190	1,1740	1,770	3,220	5,355	6,910
72	1,0170	1,1553	1,689	3,012	4,988	6,445
74	1,0150	1,1386	1,620	2,818	4,639	6,011
76	1,0133	1,1236	1,557	2,644	4,320	5,610
78	1,0117	1,1104	1,501	2,486	4,028	5,240
80	1,0103	1,0986	1,450	2,344	3,760	4,896
82	1,0091	1,0881	1,406	2,214	3,515	4,576
84	1,0080	1,0787	1,365	2,098	3,290	4,280
86	1,0071	1,0703	1,328	1,992	3,083	4,004
88	1,0063	1,0628	1,296	1,897	2,894	3,747
90	1,0056	1,0561	1,266	1,810	2,719	3,508
92	1,0049	1,0501	1,240	1,732	2,558	3,286
94	1,0043	1,0448	1,215	1,660	2,411	3,079
96	1,0039	1,0401	1,194	1,596	2,276	2,887
98	1,0034	1,0357	1,174	1,536	2,152	2,708
100	1,0030	1,0320	1,156	1,483	2,038	2,543

Прототипный ступенчатый переход с максимально плоской характеристикой $|\Gamma|_{\max} = 0,3$

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_4$	q_3	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$
0,2	504,88	254,911	432,93	374,849	364,88	321,421
0,4	252,44	63,727	216,46	93,712	182,44	80,355
0,6	168,29	28,323	144,31	41,649	121,626	35,713
0,8	126,22	15,931	108,23	23,427	91,219	20,088
1,0	100,97	10,196	86,58	14,993	72,975	12,856
1,2	84,145	7080,4	71,153	10,412	60,813	8928
1,4	72,124	5201,8	61,845	7649,6	52,125	6559,4
1,6	63,107	3982,5	54,114	5856,6	45,609	5022,0
1,8	56,095	3146,6	48,101	4627,4	40,541	3957,9
2,0	50,4843	2548,6	43,291	3748,1	36,487	3214,0
2,4	25,249	637,49	21,661	936,93	18,263	803,82
6	16,886	283,45	14,453	416,31	12,191	357,40
8	12,631	159,54	10,853	234,09	9,1601	201,15
10	10,109	102,18	8,6962	149,75	7,8451	128,83
12	8,5281	71,033	7,2606	103,989	6,1383	89,549
14	7,2286	52,252	6,2372	76,316	5,2790	65,861
16	6,3297	40,065	5,4715	58,3883	4,6369	50,487
18	5,6314	31,713	4,8776	46,098	4,1395	39,947

Приложение к табл. 9.4

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_4$	q_3	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$
20	5,0735	25,741	4,4039	37,308	3,7434	32,408
22	4,6179	21,325	4,0176	30,806	3,4210	26,830
24	4,2390	17,969	3,6969	25,862	3,1539	22,587
26	3,9192	15,360	3,4265	22,016	2,9292	19,286
28	3,6459	13,293	3,1958	18,964	2,7379	16,666
30	3,4099	11,628	2,9967	16,504	2,5732	14,552
32	3,2042	10,267	2,8234	14,492	2,4302	12,824
34	3,0237	9,1425	2,6712	12,826	2,3051	11,390
36	2,8640	8,2026	2,5366	11,4319	2,1948	10,190
38	2,7221	7,4097	2,4169	10,253	2,0970	9,1734
40	2,5952	6,7351	2,3099	9,2480	2,0074	8,3061
42	2,4813	6,1570	2,2136	8,3847	1,9316	7,5598
44	2,3787	5,6583	2,1267	7,6380	1,8612	6,9132
46	2,2859	5,2254	2,0479	6,9882	1,7577	6,3494
48	2,2017	4,8476	1,9763	6,4196	1,7401	5,8558
50	2,1251	4,5163	2,3099	5,9196	1,6877	5,4186
52	2,0553	4,2244	1,8510	5,4779	1,6398	5,0321
54	1,9915	3,9663	1,7961	5,0861	1,5661	4,6881
56	1,9331	3,7370	1,7456	4,7373	1,5560	4,3806
58	1,8796	3,5328	1,6990	4,4258	1,5192	4,1048
60	1,8303	3,3502	1,6561	4,1468	1,4852	3,8566
62	1,7850	3,1864	1,6164	3,8961	1,4539	3,6325

$\frac{2 \Delta f_{10}}{f_0} \cdot \%$	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$q_1=q_4$	q_2	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$
64	1,7433	3,0391	1,5796	3,6704	1,4249	3,4296
66	1,7048	2,9063	1,5456	3,4667	1,3982	3,2454
68	1,6692	2,7862	1,5140	3,2825	1,3733	3,0778
70	1,6363	2,6774	1,4846	3,1156	1,3503	2,9250
72	1,6058	2,5785	1,4573	2,9642	1,3289	2,7855
74	1,5775	2,4885	1,4320	2,8266	1,3090	2,6578
76	1,5512	2,4064	1,4084	2,7014	1,2905	2,5409
78	1,5268	2,3313	1,3864	2,5873	1,2732	2,4336
80	1,5042	2,2625	1,3660	2,4832	1,2572	2,3351
82	1,4830	2,1994	1,3469	2,3881	1,2222	2,2446
84	1,4633	2,1413	1,3299	2,3012	1,2882	2,1613
86	1,4449	2,0879	1,3126	2,2216	1,2152	2,0846
88	1,4278	2,0385	1,2972	2,1487	1,2031	2,0141
90	1,4117	1,9930	1,2828	2,0818	1,1917	1,9490
92	1,3967	1,9508	1,2694	2,0204	1,1812	1,8891
94	1,3826	1,9117	1,2569	1,9639	1,1713	1,8339
96	1,3695	1,8754	1,2452	1,9120	1,1621	1,7829
98	1,3571	1,8417	1,2343	1,8641	1,1536	1,7360
100	1,3455	1,8103	1,2241	1,8200	1,1456	1,6926

Продолжение табл. 9.4

$\frac{2 \Delta f_{10}}{f_0} \cdot \%$	$n = 5$		$n = 6$		$n = 7$	
	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$	$q_1=q_4$	$q_2=q_3$
0,2	312,18	255,152	825,692	271,75	201,759	752,978
0,4	156,09	63,788	206,422	135,87	50,440	188,244
0,6	104,05	28,350	91,743	90,584	22,417	257,147
0,8	78,046	15,946	51,605	67,938	12,609	114,287
1,0	62,437	10,206	33,027	54,350	8,070	64,286
1,2	52,030	7,087,4	22,935	45,292	5,604	30,118
1,4	44,597	5207,0	16,850	38,821	4,117	20,991
1,6	39,023	3986,6	12,901	33,968	3,152	16,071
1,8	34,687	3149,9	10,193	30,194	2,490	12,698
2,0	31,218	2551,4	8,256,5	27,175	2,017	10,285
4	15,608	637,76	2063,8	13,586	504	7529,5
6	10,490	28,386	897,32	9,9570	32	1882,1
8	7,8493	15,988	511,86	6,8448	224	2571,0
10	6,2995	102,43	327,56	5,4988	50	1142,4
12	5,2699	71,242	226,88	4,6056	468,02	637,96
14	4,5377	52,440	166,10	3,9712	81,104	410,08
16	3,9913	40,236	126,63	3,4985	56,446	283,96
18	3,5687	31,870	99,573	3,1335	151,14	208,42
20	3,2227	25,886	80,224	2,8440	90,476	159,15

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0} \cdot \%$	$n = 5$			$n = 6$		
	$q_1=q_*$	$q_2=q_*$	$q_3=q_*$	$q_1=q_*$	$q_2=q_*$	$q_3=q_*$
22	2,9598	21,460	65,914	2,6093	17,084	59,805
24	2,7342	18,094	55,036	2,4157	14,423	49,898
26	2,4448	15,474	46,576	2,2537	12,353	42,198
28	2,3840	13,396	39,368	2,1165	10,711	36,098
30	2,2459	11,720	34,464	1,9990	9,3872	31,184
32	2,1264	10,349	30,046	1,8977	8,3043	27,172
34	2,0207	9,2135	26,390	1,8095	7,4074	23,854
36	1,9304	8,2621	23,331	1,7323	6,6565	21,082
38	1,8494	7,4574	20,748	1,6644	6,0217	18,742
40	1,7775	6,7708	18,548	1,6043	5,4863	16,752
42	1,7132	6,1804	16,658	1,5508	5,0151	15,046
44	1,6557	5,6690	15,026	1,5031	4,6124	13,574
46	1,6033	5,2233	13,806	1,4604	4,2618	12,296
48	1,5571	4,8326	12,366	1,4220	3,9546	11,180
50	1,5147	4,4883	11,274	1,3874	3,6842	10,200
52	1,4763	4,1833	10,310	1,3561	3,4449	9,3360
54	1,4412	3,9119	9,4565	1,3278	3,2323	8,5711
56	1,4093	3,6695	8,6959	1,3021	3,0426	7,8916
58	1,3800	3,4522	8,0164	1,2787	2,8728	7,2844
60	1,3533	3,2566	7,4073	1,2574	2,7201	6,7413

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0} \cdot \%$	$n = 5$			$n = 6$		
	$q_1=q_*$	$q_2=q_*$	$q_3=q_*$	$q_1=q_*$	$q_2=q_*$	$q_3=q_*$
62	1,3287	3,0800	6,8599	1,2379	2,5825	6,2536
64	1,3060	2,9200	6,3664	1,2201	2,4582	5,8145
66	1,2852	2,7748	5,9205	1,2037	2,3454	5,0590
68	1,2660	2,6426	5,5166	1,1889	2,2429	4,7338
70	1,2482	2,5220	5,1501	1,1752	2,1495	4,7334
72	1,2318	2,4116	4,8169	1,1626	2,0643	4,3373
74	1,2166	2,3105	4,5135	1,1510	1,9863	4,1675
76	1,2025	2,2177	4,2367	1,1403	1,9148	3,9213
78	1,1895	2,1324	3,9840	1,1304	1,8492	3,6962
80	1,1773	2,0538	3,7529	1,1214	1,7889	3,4901
82	1,1661	1,9814	3,5445	1,1130	1,7333	3,3011
84	1,1556	1,9146	3,3478	1,1052	1,6820	3,1276
86	1,1459	1,8528	3,1704	1,0980	1,6347	2,9682
88	1,1368	1,7957	3,0077	1,0914	1,5910	2,8215
90	1,1284	1,7429	2,8585	1,0852	1,5506	2,6865
92	1,1205	1,6941	2,7217	1,0795	1,5131	2,5622
94	1,1132	1,6488	2,5961	1,0742	1,4784	2,4476
96	1,1064	1,6070	2,4899	1,0693	1,4463	2,3420
98	1,1000	1,5682	2,3752	1,0648	1,4165	2,2417
100	1,0942	1,5323	2,2783	1,0606	1,3889	2,1549

$2 \Delta f_n$		$n = 7$			
$f\%$	$q_1=q_8$	$q_1=q_4$	$q_4=q_6$	$q_4=q_8$	$q_1=q_8$
0,2	240,16	161,613	654,360	1,049,514	214,95
0,4	120,08	40,403	163,589	262,37	107,48
0,6	80,055	17,957	72,706	116,612	71,651
0,8	60,041	10,100	40,897	65,594	53,738
1,0	48,033	6464,4	26,174	41,980	42,991
1,2	40,027	4489,2	18,176	29,152	35,825
1,4	34,309	3298,1	13,354	21,418	20,707
1,6	30,020	2525,1	10,224	16,398	26,869
1,8	26,684	1995,1	8078,3	12,956	23,883
2,0	24,016	1616,0	6543,3	10,494	21,495
4	12,007	403,98	1635,6	2623,4	10,747
6	8,004	179,51	726,85	1165,7	7,1640
8	5,062	101,42	406,22	654,59	5,3730
10	4,8749	65,058	259,00	417,83	4,2980
12	4,0886	46,308	179,04	290,21	3,6779
14	3,5309	33,398	130,85	212,72	3,1917
16	3,1161	25,570	99,588	162,51	2,8134
18	2,7965	20,572	78,165	128,09	2,5303
20	2,5435	16,584	62,843	103,47	2,3068
22	2,2290	13,782	51,540	85,250	2,1265

Продолжение табл. 9.4

$2 \Delta f_n$		$n = 8$			
$f\%$	$q_1=q_8$	$q_1=q_4$	$q_4=q_6$	$q_4=q_8$	$q_1=q_8$
24	2,1707	11,6513	42,946	71,389	1,9787
26	2,0303	9,9942	36,272	60,599	1,8538
28	1,9117	8,6207	30,986	52,087	1,7523
30	1,8106	7,6207	26,734	44,126	1,6644
32	1,7286	6,7546	23,265	39,469	1,5892
34	1,6484	6,0375	20,400	34,779	1,5242
36	1,5827	5,4375	18,009	30,847	1,4679
38	1,5251	4,9304	15,594	27,519	1,4187
40	1,4743	4,4983	14,283	24,676	1,3755
42	1,4295	4,1272	12,818	22,228	1,3376
44	1,3896	3,8064	11,557	20,106	1,3040
46	1,3540	3,5272	10,464	18,255	1,2743
48	1,3223	3,2829	9,5106	16,630	1,2478
50	1,2938	3,0681	8,6760	15,196	1,2242
52	1,2682	2,8782	7,9416	13,924	1,2032
54	1,2451	2,7098	7,2925	12,790	1,1843
56	1,2243	2,5598	6,7174	11,778	1,1674
58	1,2055	2,4256	6,2053	10,868	1,1522
60	1,1884	2,3053	5,7479	9,048	1,1385
62	1,1729	2,1971	5,3382	8,3083	1,1126

17 Зак. 782

$\frac{2 \Delta f_n}{f_n}$	f_n %	$n = 7$				$n = 8$			
		$q_1=q_6$	$q_1=q_7$	$q_1=q_8$	$q_1=q_9$	$q_1=q_6$	$q_1=q_8$	$q_1=q_9$	$q_1=q_6$
64	1,1568	2,0995	4,9702	8,6373	1,1151	1,8308	4,1739	8,0421	10,008
66	1,1461	2,0111	4,6387	8,0275	1,1050	1,7609	3,9018	7,4740	9,3178
68	1,1344	1,9311	3,5393	7,4722	1,0959	1,6977	3,6567	6,9574	8,6872
70	1,1238	1,8583	4,0683	6,9652	1,0877	1,6404	3,4355	6,4888	8,1096
72	1,1141	1,7921	3,8225	6,5015	1,0802	1,5885	3,2353	6,0571	7,5793
74	1,1052	1,7316	3,5990	6,0766	1,0734	1,5412	3,0539	5,6641	7,0913
76	1,0971	1,6764	3,3954	5,8666	1,0673	1,4982	2,8891	5,3040	6,6416
78	1,0897	1,6253	3,2096	5,3281	1,0617	1,4589	2,7391	4,9736	6,2263
80	1,0828	1,5795	3,0398	4,9981	1,0566	1,4231	2,6023	4,6701	5,8423
82	1,0766	1,5389	2,8343	4,6941	1,0519	1,3903	2,4775	4,3508	5,4867
84	1,0709	1,4978	2,7418	4,436	1,0477	1,3603	2,3633	4,1336	5,1571
86	1,0656	1,4617	2,6109	4,1548	1,0438	1,3327	2,2587	3,8965	4,8512
88	1,0608	1,4285	2,4906	3,9157	1,0403	1,3075	2,1628	3,6777	4,5672
90	1,0563	1,3979	2,3799	3,6947	1,0371	1,2843	2,0748	3,4755	4,3033
92	1,0522	1,3696	2,2778	3,4604	1,0341	1,2629	1,9938	3,2888	4,0574
94	1,0484	1,3335	2,1838	3,2016	1,0314	1,2433	1,9193	3,1160	3,8298
96	1,0449	1,3194	2,0969	3,1269	1,0240	1,2253	1,8507	2,9562	3,6178
98	1,0417	1,2970	2,0168	2,9654	1,0267	1,2086	1,7874	2,8084	3,4206
100	1,0387	1,2763	1,9428	2,8162	1,0247	1,1933	1,7290	2,6715	3,2373

Продолжение табл. 9.4

$\frac{2 \Delta f_n}{f_n}$ %,	f_n %	$n = 9$				$n = 10$			
		$q_1=q_{10}$	$q_1=q_9$	$q_1=q_8$	$q_1=q_7$	$q_1=q_6$	$q_1=q_5$	$q_1=q_4$	$q_1=q_3$
0,2	194,40	108,846	480,175	902,434	1,178,045				
0,4	97,210	27,211	120,043	225,608	294,511				
0,6	64,800	12,094	53,352	100,270	130,893				
0,8	48,600	6802,0	30,010	56,402	73,627				
1,0	38,880	4353,0	19,206	36,097	47,121,5				
1,2	32,400	3023,0	13,338	25,067	32,723				
1,4	27,770	2221,0	9799,0	18,416	24,041				
1,6	24,300	1700,0	7502,0	14,100	18,406				
1,8	21,600	1343,0	5927,0	11,140	14,543				
2,0	19,440	1088,0	4801,0	9024,0	11,780				
4	9,721	272,09	1200,3	2255,8	2944,8				
6	6,480	120,91	533,41	1002,4	1308,6				
8	4,860	68,003	299,99	563,80	735,99				
10	3,887	43,512	191,95	360,76	470,93				
12	3,3452	30,658	133,27	250,46	326,95				
14	2,8995	22,638	97,856	183,95	240,13				
16	2,5693	17,484	74,911	140,79	183,78				
18	2,3161	13,868	59,164	111,9	145,5				
20	2,1158	11,318	45,288	90,023	117,52				
22	1,9566	9,4331	37,019	74,361	97,077				

$\frac{2\Delta f_n}{f_0}$, %	$q_1=q_{1n}$	$q_2=q_2$	$q_3=q_3$	$q_4=q_4$	$q_5=q_5$
24	1,8256	8,0003	30,749	62,448	81,520
26	1,7171	6,8864	25,887	53,177	69,417
28	1,6261	6,0038	22,046	45,820	59,814
30	1,5592	5,2929	18,962	37,453	50,761
32	1,4835	4,7122	16,454	33,112	45,045
34	1,4272	4,2321	14,888	29,513	39,534
36	1,3785	3,8308	12,670	26,132	35,127
38	1,3362	3,4924	11,228	23,270	31,395
40	1,2994	3,2045	10,007	20,826	22,206
42	1,2671	2,9577	8,9697	18,724	25,462
44	1,2388	2,7449	8,0740	16,904	23,082
46	1,2138	2,5602	7,3036	15,316	21,004
48	1,1917	2,3991	6,6352	13,924	19,179
50	1,1721	2,2549	6,0525	12,698	17,568
52	1,1548	2,1336	5,5423	11,612	16,137
54	1,1393	2,0237	5,0937	10,648	14,862
56	1,1256	1,9262	4,6978	9,7875	13,719
58	1,1133	1,8395	4,3472	9,0171	12,692
60	1,1022	1,7620	4,0357	8,3252	11,764
62	1,0925	1,6928	3,7581	7,7021	10,925

Продолжение табл. 9.4

$\frac{2\Delta f_n}{f_0}$, %	$q_1=q_{1n}$	$q_2=q_2$	$q_3=q_3$	$q_4=q_4$	$q_5=q_5$
64	1,0836	1,6306	3,5010	7,1396	10,162
66	1,0757	1,5747	3,2877	6,6305	9,4672
68	1,0686	1,5244	3,0880	6,1687	8,8320
70	1,0622	1,4789	2,9083	5,7492	8,2501
72	1,0565	1,4378	2,7461	5,3672	7,7158
74	1,0513	1,4006	2,5995	5,0189	7,2241
76	1,0467	1,3669	2,4667	4,7008	6,7708
78	1,0424	1,3362	2,3462	4,4098	6,3521
80	1,0386	1,3083	2,2367	4,1434	5,9648
82	1,0352	1,2830	2,1370	3,8990	5,6059
84	1,0321	1,2598	2,0461	3,6747	5,2730
86	1,0293	1,2387	1,9631	3,4686	4,9638
88	1,0267	1,2195	1,8873	3,2790	4,6764
90	1,0244	1,2019	1,8178	3,1049	4,4090
92	1,0223	1,1858	1,7542	2,9435	4,1600
94	1,0204	1,1710	1,6958	2,7951	3,9282
96	1,0187	1,1575	1,6422	2,6581	3,7122
98	1,0171	1,1451	1,5929	2,5317	3,6109
100	1,0157	1,1338	1,5476	3,3233	

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$q_1=q_{11}$	$q_2=q_{10}$	$q_3=q_9$	$q_4=q_8$	$q_5=q_7$	q_6
0,2	177,42	91,352	412,926	810,413	1,131,987	1,254,818
0,4	88,710	22,838	103,231	202,603	282,997	313,704
0,6	59,140	10,150	45,881	50,651	125,776	139,424
0,8	44,355	57,09,5	25,808	32,416	70,749	78,426
1,0	35,484	3654,1	16,517	22,511	45,279	50,192
1,2	29,570	2537,5	11,470	16,539	31,444	34,856
1,4	25,346	1864,3	8,427	12,662	23,102	25,608
1,6	12,177	1427,4	6451,9	10,005	17,687	19,606
1,8	19,713	1127,8	5097,8	8,103,9	13,975	15,491
2,0	17,742	913,50	4129,2	1032,2	11,320	12,548
4	8,870	228,36	458,71	900,28	2829,7	3136,7
6	5,930	101,48	455,71	506,33	1257,5	1393,9
8	4,4350	57,076	257,99	323,99	707,24	783,99
10	3,5470	36,521	165,08	224,94	452,55	501,65
12	2,9940	25,356	114,61	165,22	314,20	348,29
14	2,6247	18,624	84,182	126,45	230,77	255,82
16	2,3529	14,814	61,350	98,324	176,63	195,79
18	2,1410	11,711	48,151	79,298	137,64	154,64
20	1,9619	9,572	38,538	65,218	111,61	125,21
22	1,8185	7,9908	31,447	31,447	92,383	103,43

Продолжение табл. 9.4

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0}$, %	$q_1=q_{11}$	$q_2=q_{10}$	$q_3=q_9$	$q_4=q_8$	$q_5=q_7$	q_6
24	1,7016	6,7896	26,076	54,507	77,500	86,867
26	1,6052	5,8561	21,916	46,170	65,726	73,92
28	1,5247	5,1162	18,634	39,553	56,494	63,090
30	1,4570	4,5227	16,004	34,212	49,054	54,636
32	1,3995	4,0360	13,858	29,841	42,964	47,812
34	1,3503	3,6348	12,112	26,218	37,901	42,341
36	1,3081	3,2998	10,655	23,181	33,664	37,632
38	1,2716	3,0175	9,4339	20,612	30,077	33,646
40	1,2469	2,7778	8,4027	18,420	27,012	30,258
42	1,2125	2,5726	7,5257	16,534	24,373	27,338
44	1,1885	2,3939	6,7751	14,902	22,084	24,806
46	1,1674	2,2929	6,1289	13,480	20,086	22,596
48	1,1489	2,1097	5,5696	12,235	18,332	20,654
50	1,1327	1,9931	5,0832	11,140	16,783	18,940
52	1,1186	1,8908	4,6583	10,171	15,408	17,420
54	1,1057	1,8006	4,2858	9,3119	14,182	16,064
56	1,0945	1,7208	3,9578	8,5467	13,084	14,850
58	1,0845	1,6500	3,6680	7,8630	12,097	13,758
60	1,0757	1,5870	3,4113	7,2504	11,206	12,772
62	1,0679	1,5306	3,1831	6,7001	10,400	11,879

$n = 10$

$\frac{2 \Delta f_{11}}{f_0} \cdot \%$	$q_1=q_{11}$	$q_2=q_{10}$	$q_3=q_9$	$q_4=q_8$	$q_5=q_7$	$q_6=q_6$
64	1,0609	1,4806	2,9797	6,2046	9,6678	11,068
66	1,0547	1,4357	2,7980	5,7574	9,0011	10,327
68	1,0492	1,3953	2,6352	5,3520	8,3924	9,6507
70	1,0443	1,3593	2,4890	4,4867	7,8353	9,0380
72	1,0398	1,3264	2,3575	4,6543	7,3243	8,4593
74	1,0359	1,2969	2,2390	4,3523	6,8547	7,9335
76	1,0324	1,2703	2,1320	4,0774	6,4223	7,4478
78	1,0292	1,2463	2,0352	3,8268	6,0235	6,9982
80	1,0264	1,2246	1,9475	3,5983	5,6552	6,5813
82	1,0239	1,2049	1,8679	3,3894	5,3446	6,1939
84	1,0216	1,1870	1,7955	3,1985	4,9902	5,8335
86	1,0195	1,1708	1,7297	3,0236	4,7069	5,4976
88	1,0177	1,1561	1,6698	2,8634	4,4857	5,1842
90	1,0160	1,1423	1,6161	2,7165	4,1838	4,8915
92	1,0146	1,1306	1,5652	2,5816	3,9199	4,6179
94	1,0132	1,1196	1,5200	2,4576	3,7323	4,3618
96	1,0120	1,1095	1,4778	2,3436	3,5300	4,1222
98	1,0109	1,1003	1,4396	2,2988	3,3418	3,8977
100	1,0099	1,0919	1,4046	2,1422	3,1666	3,6875

Продолжение табл. 9.4

 $n = 11$

$\frac{2 \Delta f_{11}}{f_0} \cdot \%$	$q_1=q_{11}$	$q_2=q_{11}$	$q_3=q_{10}$	$q_4=q_9$	$q_5=q_8$	$q_6=q_7$
0,2	163,11	77,662	357,360	723,687	1 060,337	1 260,426
0,4	81,556	19,415	89,340	180,922	265,084	315,106
0,6	54,371	86,290	39,707	80,409	117,815	140,047
0,8	40,778	48,640	22,335	45,230	66,271	78,776
1,0	32,622	3106,0	14,294	28,947	42,413	50,417
1,2	27,185	2157,0	9926,0	20,102	29,454	35,012
1,4	23,302	1585,0	7293,0	14,769	21,639	25,723
1,6	20,389	1213,0	5584,0	11,306	16,568	19,694
1,8	18,123	958,80	4412,0	8934,3	13,090	15,561
2,0	16,311	776,60	3573,5	7236,7	10,604	12,604
4	8,155	194,13	893,33	1809,0	2050,6	3150,8
6	5,436	86,276	396,99	803,95	1177,9	1400,2
8	4,077	48,524	223,28	452,16	682,50	787,52
10	3,261	31,049	142,87	269,33	423,93	503,92
12	2,801	21,558	99,198	200,88	294,33	349,87
14	2,445	15,834	72,861	147,55	216,19	256,99
16	2,188	12,120	55,768	112,94	165,47	196,70
18	1,988	9,573	44,049	89,204	130,69	155,36
20	1,834	7,812	35,666	72,228	105,82	125,79
22	1,706	6,645	26,525	58,309	87,424	103,92

$n = 11$

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0} \cdot \%$	$q_1 = q_{12}$	$q_2 = q_{11}$	$q_3 = q_{10}$	$q_4 = q_9$	$q_5 = q_8$	$q_6 = q_7$
24	1,600	5,843	22,238	48,383	73,427	87,283
26	1,514	5,051	18,680	40,936	61,403	73,870
28	1,442	4,424	15,842	35,025	52,768	58,397
30	1,382	3,920	13,587	30,255	45,804	54,804
32	1,332	3,508	11,759	26,351	40,084	48,196
34	1,289	3,169	10,260	23,115	35,349	42,548
36	1,252	2,886	9,016	20,405	31,381	37,786
38	1,220	2,648	7,980	18,113	28,015	33,831
40	1,193	2,446	7,106	16,158	25,143	30,418
42	1,170	2,274	6,364	14,428	22,670	27,481
44	1,149	2,126	5,730	13,025	20,524	24,941
46	1,132	1,998	5,136	11,762	18,651	22,722
48	1,116	1,886	4,716	10,656	17,006	20,774
50	1,103	1,789	4,309	9,685	15,553	19,054
52	1,091	1,704	3,954	8,828	14,264	17,527
54	1,080	1,630	3,633	8,070	13,114	16,166
56	1,071	1,564	3,371	7,396	12,085	14,947
58	1,063	1,506	3,130	6,795	11,160	13,851
60	1,056	1,444	2,918	6,258	10,326	12,861
62	1,050	1,409	2,730	5,778	9,571	11,965

17B*

$\frac{2 \Delta f_n}{f_0} \cdot \%$	$q_1 = q_{12}$	$q_2 = q_{11}$	$q_3 = q_{10}$	$q_4 = q_9$	$q_5 = q_8$	$q_6 = q_7$
64	1,044	1,368	2,563	5,346	8,886	11,151
66	1,040	1,331	2,414	4,958	8,263	10,408
68	1,035	1,299	2,280	4,608	7,695	9,729
70	1,032	1,270	2,161	4,292	7,176	9,101
72	1,028	1,244	2,054	4,006	6,700	8,534
74	1,025	1,220	1,959	3,747	6,284	8,007
76	1,023	1,199	1,872	3,513	5,863	7,520
78	1,020	1,180	1,794	3,300	5,494	7,069
80	1,018	1,164	1,724	3,107	5,154	6,651
82	1,016	1,148	1,659	2,930	4,841	6,262
84	1,014	1,134	1,602	2,770	4,551	5,901
86	1,013	1,122	1,550	2,624	4,284	5,564
88	1,0117	1,111	1,503	2,490	4,036	5,250
90	1,0105	1,100	1,460	2,368	3,808	4,957
92	1,0095	1,092	1,420	2,257	3,596	4,582
94	1,0085	1,083	1,385	2,155	3,400	4,425
96	1,0077	1,076	1,352	2,061	3,218	4,184
98	1,0070	1,069	1,223	1,976	3,049	3,959
100	1,0063	1,063	1,296	1,897	2,893	3,747

9.3. ФИЛЬТР НА ИНДУКТИВНЫХ ПРОВОДИМОСТЯХ

Фильтр состоит из индуктивных проводимостей и разделяющих их отрезков передающей линии (рис. 9.4).

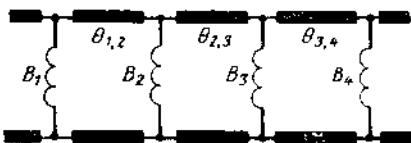
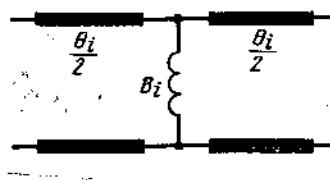


Рис. 9.4. Схема фильтра на индуктивных проводимостях.

Звено фильтра изображено на рис. 9.5. Условия (9.6) и (9.7) выполняются приближенно в некоторой, довольно узкой, полосе частот.

Рис. 9.5. Звено фильтра на индуктивных проводимостях.



Расчетные формулы имеют вид:

$$B_i = \frac{q_i - 1}{\sqrt{q_i}}, \quad (9.8)$$

$$\theta_{i,i+1} = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} = \frac{1}{2} \left(\pi + \arctg \frac{B_i}{2} + \arctg \frac{B_{i+1}}{2} \right), \quad (9.9)$$

где B_i — индуктивная проводимость в i -м звене;

$\theta_{i,i+1}$ — электрическая длина отрезка линии между i -й и $(i+1)$ индуктивными проводимостями.

Характер резонанса — полуволновый (т. е. $\theta_{i,i+1} \approx \pi$) и длина резонатора равна $\approx \lambda_0/2$, отсюда следует, что прототип (ступенчатый переход) необходимо брать с полосой пропускания W_n , вдвое большей, чем требуемая полоса пропускания фильтра V_n :

$$W_n = 2V_n, \quad (9.10)$$

где W_n — полоса пропускания прототипа (ступенчатого перехода); V_n — полоса пропускания фильтра на индуктивных проводимостях.

Число звеньев прототипа рассчитывается по формулам (9.3) либо (9.4).

Пример. 1. Рассчитать фильтр с непосредственными связями на параллельных индуктивных проводимостях с максимально плоской характеристикой рабочего затухания. Полоса пропускания фильтра $V_n = 5\%$ по уровню допустимого коэффициента отражения $|\Gamma|_{\max} = 0,2$, полоса заграждения $V_3 = 40\%$ по уровню рабочего затухания $b_3 = 20$ дБ.

Число звеньев прототипа фильтра определяем по формуле (9.4):

$$n = \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\lg \frac{\sin W_3 \frac{\pi}{4}}{\sin W_n \frac{\pi}{4}}} = \frac{\lg \sqrt{\frac{100 - 1}{1,042 - 1}}}{\lg \frac{\sin 0,8 \frac{\pi}{4}}{\sin 0,1 \frac{\pi}{4}}} = 1,93.$$

Принимаем $n = 2$.

В качестве прототипа выбираем двухступенчатый переход с полосой пропускания $W_n = 10\%$ по уровню $|\Gamma|_{\max} = 0,2$.

Перепады волновых сопротивлений ступенек перехода $q_1 = q_3 = 8,145$; $q_2 = 66,334$ определяем по таблицам.

Индуктивные проводимости неоднородностей фильтра определяем по формуле (9.8)

$$B_i = \frac{q_i - 1}{\sqrt{q_i}};$$

$$B_1 = B_3 = 2,503; \quad B_2 = 8,022.$$

Электрическая длина отрезка линии между индуктивными проводимостями определяется по формуле (9.9).

$$\theta_{i,i+1} = \frac{1}{2} \left(\pi + \arctg \frac{B_i}{2} + \arctg \frac{B_{i+1}}{2} \right);$$

$$\theta_{1,2} = \theta_{2,3} = \frac{1}{2} \left(\pi + \arctg \frac{2,503}{2} + \arctg \frac{8,022}{2} \right) = 2,683 \text{ рад.}$$

Для сравнения приводится расчет фильтра с непосредственными связями по формулам Саусвортса ([1], стр. 314).

Индуктивная проводимость крайних неоднородностей определяется по формуле

$$B_1 \approx \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{f_c^2}{f_0^2} \right) \frac{f_0}{\Delta f} \sin \frac{\pi}{2n}},$$

где n — число контуров (резонаторов);

Δf — полоса пропускания по уровню $B_n = 3 \text{ дБ}$;

f_c — критическая частота волновода (в рассматриваемом случае равна нулю).

Исходя из формулы рабочего затухания прототипа (9.2) и заданной характеристики, определяем полосу пропускания прототипа по уровню $B_n = 3 \text{ дБ}$. $W_n = 22,32\%$, отсюда полоса пропускания фильтра $V_n = 11,16\%$.

Индуктивная проводимость крайних неоднородностей

$$B_1 = B_3 = 2,84.$$

Индуктивная проводимость средней неоднородности определяется по формуле

$$B_2 \approx \frac{2V_2}{\pi} \left(1 - \frac{f_c^2}{f_o^2} \right) \frac{f_o}{\Delta f} \sqrt{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{2(m-1)}{n} \pi};$$
$$B_2 = 8,069.$$

Электрическая длина отрезка линии между индуктивными проводимостями равна $\theta_{1,2} = \theta_{2,3} = 2,715 \text{ рад.}$

2. Расчет фильтра с теми же параметрами, но с учетом дисперсии. Крайние частоты полосы пропускания:

$$f_1 = 2854 \text{ МГц}; \lambda_1 = 10,51 \text{ см}; \Delta_1 = 15,36 \text{ см};$$

$$f_2 = 3000 \text{ МГц}; \lambda_2 = 10 \text{ см}; \Delta_2 = 13,88 \text{ см}.$$

Средняя длина волны в волноводе

$$\Lambda_{cp} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = 14,62 \text{ см}$$

соответствует $\lambda_{cp} = 10,25 \text{ см}$

Относительная полоса пропускания фильтра по длине волны в волноводе

$$V_n = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Lambda_{cp}} = 0,1 = 10\%$$

Перепады волновых сопротивлений перехода с полосой пропускания $W_n = 2V_n = 20\%$ определим по таблицам. Индуктивные проводимости в этом случае равны

$$B_1 = B_3 = 1,528; \quad B_2 = 3,847;$$

электрическая длина отрезков линии между проводимостями равна

$$\theta_{1,2} = \theta_{2,3} = 2,442.$$

Проверка показала, что коэффициент отражения фильтра на средней частоте полосы пропускания $|\Gamma| \approx 0$; на крайней частоте полосы пропускания $|\Gamma| = 0,1348$ (вместо заданного $|\Gamma|_{\max} = 0,2$).

Для сравнения определяем проводимости фильтра по формулам из [1]:

$$B_1 = B_3 = 1,995; \quad B_2 = 5,6684;$$

электрическая длина отрезков линий между проводимостями равна

$$\theta_{1,2} = \theta_{2,3} = 2,5788.$$

9.4. СТУПЕНЧАТЫЙ ФИЛЬТР

Ступенчатый фильтр состоит из отрезков передающей линии одинаковой длины и различного волнового сопротивления. В отличие от ступенчатого перехода, где изменение волнового сопротивления от ступеньки к ступеньке происходит монотонно, в ступенчатом фильтре эти изменения носят периодический характер (рис. 9.6).

Фильтр состоит из звеньев двух типов (рис. 9.7, а, б).

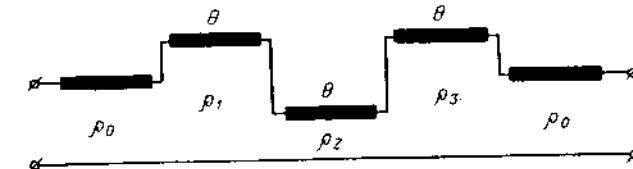


Рис. 9.6. Ступенчатый фильтр.

В звене первого типа (рис. 9.7, а) перепад волновых сопротивлений больше единицы

$$q_i = \frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} > 1, \quad (9.11)$$

и коэффициент передачи такого звена в точности соответствует коэффициенту передачи звена прототипа.

В звене второго типа (рис. 9.7, б) перепад волновых сопротивлений меньше единицы

$$p_{i+1} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} < 1, \quad (9.12)$$

однако коэффициент передачи такого звена может быть преобразован [3], после чего цепочка имеет всюду $q_i > 1$ и новую частотную переменную.

Расчетные формулы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} q_i \text{ фильтра} &= q_i \text{ перехода}, \\ p_{(i+1)} \text{ фильтра} &= \frac{1}{q_{(i+1)} \text{ перехода}}; \end{aligned} \right\} \quad (9.13)$$

$$\varphi_i = \Phi_{(i+1)} = \Phi = \theta - \frac{\pi}{2}, \quad (9.14)$$

где θ — длина ступеньки ступенчатого фильтра.

Из (9.14) следует, что частотные характеристики ступенчатого фильтра (рис. 9.8, а) сдвинуты на $\pi/2$ относительно соответствующих характеристик ступенчатого перехода (рис. 9.8, б); иначе говоря их можно получить, если в выражениях (9.1) и (9.2) $\cos \theta$ заменить на $\sin \theta$:

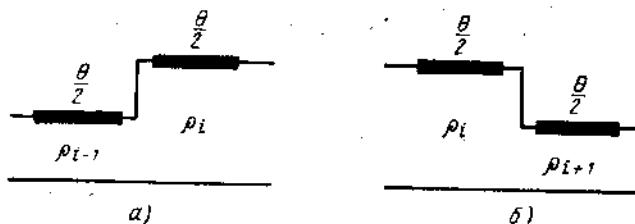


Рис. 9.7. Звено ступенчатого фильтра:
а—первого типа; б—второго типа

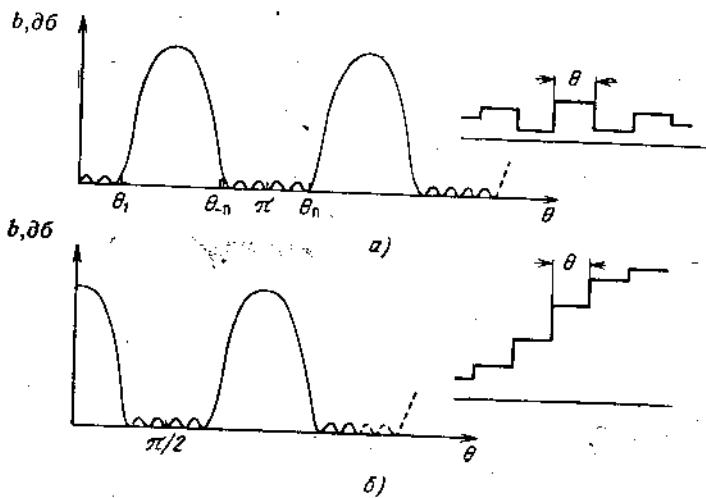


Рис. 9.8. Амплитудно-частотные характеристики:
а—ступенчатого фильтра; б—ступенчатого перехода.

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 T_n^2 \left(\frac{\sin \theta}{S} \right)^2. \quad (9.15)$$

(Чебышевская характеристика);

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 \left(\frac{\sin \theta}{S} \right)^{2n} \quad (9.16)$$

(максимально плоская характеристика).

Число звеньев рассчитывается по формулам (9.3) либо (9.4). Характер резонанса — полуволновый, т. е. длина резонатора — ступеньки равна $\Lambda_0/2$ ($0(f_0) = \pi$), следовательно, как и ранее, следует брать прототип с удвоенной по отношению к полосе пропускания фильтра полосой пропускания

$$W_n = 2V_n, \quad (9.17)$$

где V_n — полоса пропускания фильтра;
 W_n — полоса пропускания прототипа [см. определения (9.5)].
Длина ступеньки l ступенчатого фильтра равна

$$l = \frac{\Lambda_{\text{п}} - \Lambda_n}{\Lambda_{\text{п}} + \Lambda_n} = \frac{\Lambda_0}{2}. \quad (9.18)$$

Первая полоса пропускания (рис. 9.8, а) ступенчатого фильтра дает возможность использовать этот тип фильтра как фильтр гармоник [6].

9.5. ФИЛЬТР НА СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

Схематическое изображение фильтра дано на рис. 9.9 (здесь и далее изображены лишь средние проводники симметричной полосковой линии), звена фильтра — на рис. 9.10. Расчетные формулы имеют вид

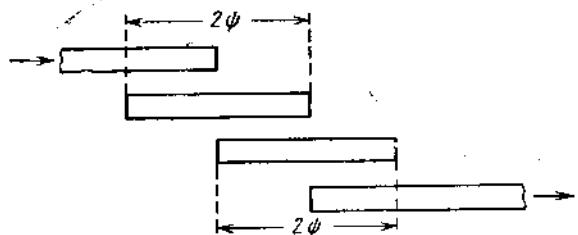


Рис. 9.9. Схематическое изображение фильтра на связанных полосковых линиях.

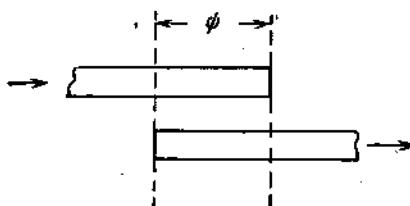


Рис. 9.10. Звено фильтра на связанных полосковых линиях.

$$r_i = \frac{1}{V q_i}; \quad (9.19)$$

$$\varphi_i = \varphi_{i+1} = \varphi = 2\psi - \frac{\pi}{2}, \quad (9.20)$$

где r_i — сопротивление связи;

2ψ — электрическая длина контура.

Подробные сведения даны в гл. 10.

9.6. РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМИ СВЯЗЯМИ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРОТОТИПНЫХ СХЕМ

Расчет полосно пропускающих фильтров с непосредственными связями можно проводить по методу модифицированных прототипных схем [4], основанному на использовании идеальных преобразователей сопротивлений, включенных между последовательными элементами фильтра с сосредоточенными постоянными. Исходными являются схемы фильтров нижних частот рис. 9.11, а, б.

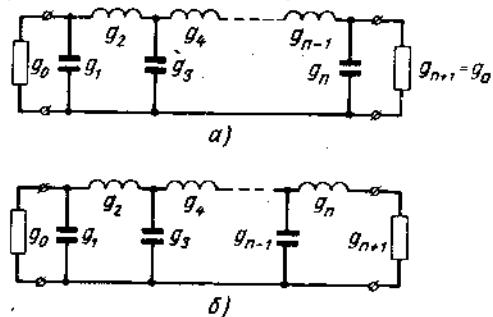


Рис. 9.11. Фильтр нижних частот с сосредоточенными постоянными:

а — с нечетным числом элементов; б — с четным числом элементов.

На СВЧ идеальные преобразователи сопротивления реализуются, в частности, в виде неоднородностей индуктивного типа, включенных в однородную линию передачи и рассчитываемых по приведенным ниже формулам.

Расчетные соотношения для схем прототипного фильтра нижних частот с четным и нечетным числом элементов (рис. 9.11):

1. Чебышевская частотная характеристика прототипного фильтра нижних частот (рис. 9.12) описывается уравнением¹

$$b = 10 \lg \left\{ 1 + \left(10^{\frac{b_n}{10}} - 1 \right) T_n^2(\omega') \right\}, \quad (9.21)$$

¹ Здесь дана запись [4], несколько отличная по форме от (8.1).

где $\omega' = \frac{\omega}{\omega_1}$ — круговая частота, нормированная по граничной частоте характеристики фильтра.

На границе полосы пропускания

$$\omega' = \omega_1 = 1;$$

b_n — допустимое затухание (в децибелах) в полосе пропускания, связанное с допуском на рассогласование $|\Gamma|_{\max}$ и амплитудным множителем h соотношениями:

$$b_n = 10 \lg \left\{ \frac{1}{1 - |\Gamma|_{\max}^2} \right\} = 10 \lg (1 + h^2); \quad (9.22)$$

$$h = \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}}. \quad (9.23)$$

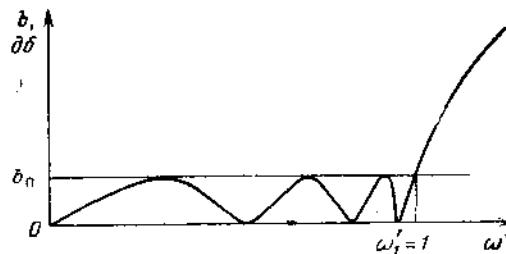


Рис. 9.12. Чебышевская частотная характеристика прототипного фильтра нижних частот.

Чебышевский фильтр нижних частот с нечетным числом элементов имеет одинаковые нагрузочные сопротивления слева и справа

$$g_0 = g_{n+1}.$$

Величина нагрузочного сопротивления при четном числе элементов выражается формулой

$$r = \operatorname{th}^2 \frac{\beta}{4}, \quad (9.24)$$

где

$$\beta = \ln \left(\operatorname{cosech} \frac{b_n}{17,37} \right). \quad (9.25)$$

Параметры элементов фильтров (рис. 9.11) рассчитываются по формуле

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \frac{2a_1}{y}, \\ g_k &= \frac{4a_{k-1}a_k}{b_{k-1}g_{k-1}}, \\ k &= 2, 3, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (9.26)$$

где

$$a_k = \sin \left[\frac{2(k-1)\pi}{2n} \right];$$

$$b_k = y^2 + \sin^2 \left(\frac{k\pi}{n} \right);$$

$$y = \operatorname{sh} \frac{\beta}{2n};$$

при нечетном числе элементов

$$g_n = g_1; \quad (9.27)$$

при чётном

$$g_n = g_1 r. \quad (9.28)$$

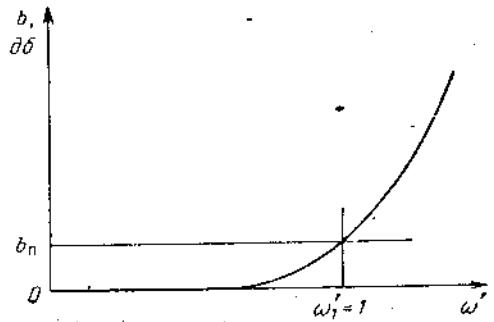


Рис. 9.13. Максимально плоская частотная характеристика фильтра нижних частот

В табл. 9.5 приводятся численные значения параметров схемы (рис. 9.11) g_1, g_2, \dots, g_n и r , полученные с помощью (9.22) — (9.28) для числа звеньев

$n = 2 \div 20$ и $b_n = 0,01 \div 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ и $3,0 \text{ дБ}$.

2. Максимально плоская частотная характеристика фильтра нижних частот (рис. 9.13) описывается уравнением

$$b = 10 \lg \left\{ 1 + \left(\frac{b_n}{10^{10}} - 1 \right) (\omega')^{2n} \right\}. \quad (9.29)$$

* При этом $g_i = 2 Q_i S$ (см. табл. 8.2).

Таблица 9.5

Параметры элементов фильтров-прототипов с чебышевской характеристикой

E_i	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
2	0,448891	0,407804	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0,629191	0,970292	0,639191	—	—	—	—	—	—	—
4	0,712878	1,200358	1,321296	0,647628	—	—	—	—	—	—
5	0,756342	1,304925	1,577317	1,304925	0,756342	—	—	—	—	—
6	0,781361	1,360015	1,689684	1,583028	1,497039	0,709842	0,796955	0,733396	—	—
7	0,796955	1,392427	1,748143	1,63131	1,748143	1,392427	1,554556	1,427062	0,814472	—
8	0,807288	1,413085	1,782449	1,683340	1,832940	1,619302	1,804368	1,581736	0,744635	—
9	0,84472	1,427062	1,804368	1,712842	1,905798	1,712542	1,802450	1,652751	—	—
10	0,819660	1,436960	1,819288	1,731116	1,936240	1,759016	1,905529	1,652751	0,744635	—
11	0,823526	1,444229	1,829884	1,743723	1,955480	1,785545	1,955480	1,743723	1,829884	1,444229
12	0,826482	1,449726	1,837729	1,752707	1,968487	1,802202	1,983777	1,788312	1,929295	1,665522
13	0,828792	1,453984	1,844369	1,759355	1,977734	1,83409	2,001437	1,813409	1,977734	1,759355
14	0,830630	1,457350	1,848354	1,764425	1,984570	1,821351	2,03263	1,828989	2,004855	1,802923
15	0,832117	1,460058	1,852055	1,768387	1,989782	1,827209	2,021614	1,849378	2,021614	1,827209
16	0,833337	1,462269	1,855050	1,771547	1,993856	1,831669	2,027756	1,846687	2,032744	1,842156
17	0,834349	1,464097	1,857508	1,774110	1,997109	1,835153	2,032424	1,852049	2,040549	1,852049
18	0,835199	1,465627	1,859551	1,777622	1,999750	1,837933	2,036065	1,861114	2,046259	1,858965
19	0,835919	1,466919	1,861269	1,777980	2,001927	1,840191	2,038968	1,859779	2,050578	1,864011
20	0,836535	1,468022	1,862726	1,779463	2,003745	1,842053	2,041324	1,861800	2,033935	1,867820

Продолжение табл. 9.5
 $b_{\Pi} = 0.01 \partial\delta$; ($\Gamma_{\max} = 0.05$); $1/r = 1.100751$

n	g_i	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11	0,893526										
12	1,593788	0,750833									
13	1,833699	1,453984	0,828792								
14	1,92194	1,679174	1,604180	0,754601							
15	1,989782	1,768387	1,852055	1,460058	0,832117						
16	2,016212	1,811359	1,950633	1,685257	1,609594	0,757060					
17	2,032424	1,835153	1,997109	1,774110	1,855708	1,664097	0,834349				
18	2,043120	1,849704	2,023107	1,816713	1,955178	1,689346	1,613290	0,758751			
19	2,050578	1,859279	2,038968	1,840191	2,001927	1,777980	1,861269	1,466919	0,835919		
20	2,056006	1,865939	2,049379	1,854482	2,027642	1,820343	1,958746	1,692123	1,615327	0,759964	

Продолжение табл. 9.5
 $b_{\Pi} = 0.1 \partial\delta$; ($\Gamma_{\max} = 0.15$); $1/r = 1.355382$

n	g_i	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	0,843069	0,622015	1,031585	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,031585	1,147400	1,703778	0,818080	—	—	—	—	—	—	—
4	1,10883	1,306183	1,975027	1,371210	1,146838	—	—	—	—	—	—
5	1,146838	1,371210									
6	1,168135	1,403967	2,056235	1,517088	1,902913	0,8611848	1,422802	1,181203			
7	1,181203	1,422802	2,096894	1,573393	2,096694	1,564075	1,944497	0,877845			
8	1,189776	1,434649	2,119920	1,601002	2,169969	1,616713	2,134573	1,442396	1,198696		
9	1,195696	1,442996	2,135753	1,616713	2,205390	1,641863	2,204643	1,582177	1,962955	0,885323	
10	1,199953	1,448193	2,144455	1,626584	2,225352						
11	1,203113	1,452287	2,151459	1,633231	2,237814	1,655912	2,237814	1,633231	2,151459	1,452287	
12	1,205524	1,455374	2,158616	1,637944	2,246173	1,664625	2,256204	1,657224	2,220040	1,591149	
13	1,207403	1,457760	2,160529	1,641419	2,252086	1,670443	2,267541	1,670443	2,252086	1,641419	
14	1,208898	1,459643	2,163874	1,644062	2,266442	1,674534	2,275076	1,673549	2,266649	1,664801	
15	1,210104	1,461156	2,165992	1,646123	2,259754	1,677559	2,280369	1,683912	2,280369	1,677559	
16	1,211093	1,463380	2,167945	1,647764	2,282338	1,677849	2,284248	1,687666	2,28434	1,685316	
17	1,211914	1,463409	2,165547	1,645094	2,264398	1,681634	2,281789	1,690411	2,293364	1,690411	
18	1,212602	1,464261	2,170878	1,650189	2,266069	1,683056	2,289473	1,692486	2,293557	1,693955	
19	1,213184	1,464981	2,171995	1,651100	2,267445	1,684209	2,291301	1,694999	2,296668	1,696532	
20	1,213682	1,465594	2,172944	1,651867	2,268593	1,685160	2,292779	1,695382	2,300772	1,689472	

$b_n = 0,1 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,15); 1/r = 1,355382$

n	ε_l	ε_1	ε_{13}	ε_{14}	ε_{15}	ε_{16}	ε_{17}	ε_{18}	ε_{19}	ε_{10}	ε_{11}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,203113	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	1,972588	0,889433	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,160529	1,457760	1,207403	—	—	—	—	—	—	—	—
14	2,288332	1,596283	1,978374	0,891922	—	—	—	—	—	—	—
15	2,539754	1,646123	2,165992	1,461156	1,210104	—	—	—	—	—	—
16	2,276838	1,669151	2,233351	1,599508	1,982097	0,893542	—	—	—	—	—
17	2,297189	1,681634	2,264398	1,649094	2,169547	1,463009	1,211914	—	—	—	—
18	2,298966	1,669175	2,28184	1,671904	2,236637	1,601671	1,984634	0,894654	—	—	—
19	2,298668	1,664099	2,291301	1,684209	2,267445	1,651100	2,171995	1,464981	1,213184	—	—
20	2,302079	1,697508	2,297891	1,691610	2,284037	1,673766	2,238912	1,603195	1,986441	0,895451	—

Продолжение табл. 9.5

 $b_n = 0,2 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,21); 1/r = 1,538586$

n	ε_l	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}
2	1,037869	0,674560	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,227573	1,152541	1,227578	0,846800	—	—	—	—	—	—	—
4	1,302876	1,284424	1,976199	0,846800	1,339477	—	—	—	—	—	—
5	1,339477	1,337008	2,166086	1,337008	1,339477	—	—	—	—	—	—
6	1,359845	1,363210	2,239498	1,455555	2,097417	0,883827	1,372295	—	—	—	—
7	1,372295	1,378193	2,275588	1,501146	2,2755688	1,378193	1,372295	—	—	—	—
8	1,380445	1,387598	2,296555	1,521784	2,341398	1,492509	2,134924	0,897215	—	—	—
9	1,386064	1,393878	2,309855	1,534034	2,322831	1,534034	2,309855	1,393878	1,386064	—	—
10	1,390099	1,398392	2,318106	1,541707	2,360455	1,553669	2,372050	1,506646	2,161409	0,903490	—
11	1,393093	1,401555	2,324500	1,548665	2,401425	1,564581	2,401425	1,546865	2,324300	1,401535	—
12	1,395376	1,403972	2,328857	1,550518	2,408770	1,571329	2,417627	1,565573	2,385606	1,513634	—
13	1,397154	1,405854	2,332314	1,553209	2,413959	1,575827	2,427586	1,575827	2,413959	1,553209	—
14	1,398568	1,407339	2,335001	1,556254	2,447779	1,578994	2,434193	1,582096	2,429419	1,571428	—
15	1,399709	1,408531	2,337135	1,556849	2,420682	1,581320	2,438828	1,586237	2,438828	1,581320	—
16	1,400644	1,40503	2,338658	1,558118	2,422946	1,593085	2,442224	1,589132	2,445019	1,587316	—
17	1,401420	1,410396	2,340271	1,559146	2,424750	1,584460	2,444795	1,591247	2,449353	1,591247	—
18	1,402070	1,410973	2,341444	1,559992	2,426213	1,585556	2,446797	1,592846	2,452474	1,593979	—
19	1,402620	1,411544	2,342429	1,560696	2,427417	1,586445	2,448390	1,594087	2,454844	1,593963	—
20	1,403091	1,412028	2,343265	1,561289	2,428422	1,587177	2,449681	1,595074	2,456622	1,597456	—

n	g_i	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}	g_{21}	g_{22}	g_{23}	g_{24}	g_{25}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,393093	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,160132	0,906919	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,332314	1,405654	1,307154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	2,392893	1,517627	2,165312	0,908993	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	2,420632	1,556649	2,337135	1,408531	1,399709	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	2,435714	1,574787	2,397300	1,520134	2,168642	0,910343	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	2,444795	1,584460	2,424750	1,559146	2,340271	1,414396	1,401420	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	2,450731	1,590289	2,439516	1,567910	2,40183	1,521614	2,170911	0,911269	—	—	—	—	—	—	—	—
19	2,454844	1,594087	2,448390	1,586445	2,427417	1,560696	2,342429	1,411544	1,402620	—	—	—	—	—	—	—
20	2,457325	1,596713	2,454160	1,592163	2,442010	1,578345	2,402179	1,522998	2,172527	0,911932	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 9.5

 $b_n = 0,3 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,26); 1/r = 1,696744$

n	g_i	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}
2	1,180460	0,695721	1,378412	1,371261	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,371261	1,1378412	2,127177	0,852059	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	1,446726	1,2536682	2,309514	1,299208	1,481677	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	1,481677	1,299208	2,309514	1,299208	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	1,601615	1,321762	2,379027	1,4021113	2,242691	0,884998	1,334623	1,513780	—	—	—	—	—	—	—	—
7	1,513780	1,334623	2,413104	1,402889	2,413104	1,43635	1,43635	2,271713	0,896554	—	—	—	—	—	—	—
8	1,521732	1,342674	2,432512	1,455711	2,475059	1,456113	2,447100	1,348059	1,348059	1,522710	—	—	—	—	—	—
9	1,527210	1,348059	2,444700	1,469113	2,504534	1,469113	2,447100	1,447100	1,447100	2,29732	0,902400	—	—	—	—	—
10	1,531144	1,351844	2,452897	1,475618	2,521016	1,487796	2,503745	1,4465650	1,4465650	—	—	—	—	—	—	—
11	1,534060	1,354669	2,455869	1,479987	2,531258	1,495044	2,531258	1,479987	1,479987	2,455869	1,354609	—	—	—	—	—
12	1,536283	1,356591	2,462959	1,483078	2,558110	1,500753	2,546393	1,495871	1,495871	2,511903	1,451580	—	—	—	—	—
13	1,538015	1,358299	2,466190	1,483355	2,552948	1,504555	2,555682	1,504555	1,504555	2,549948	1,485355	—	—	—	—	—
14	1,539391	1,359568	2,468705	1,487085	2,546508	1,507230	2,561838	1,509886	1,509886	2,557383	1,500821	—	—	—	—	—
15	1,540502	1,360587	2,470700	1,489434	2,549212	1,509194	2,561655	1,513354	1,513354	2,566155	1,509194	—	—	—	—	—
16	1,541412	1,361417	2,472310	1,489506	2,551321	1,510684	2,569316	1,515798	1,515798	2,571020	1,514263	—	—	—	—	—
17	1,542167	1,362103	2,473631	1,490376	2,553000	1,511845	2,571709	1,517583	1,517583	2,575397	1,515783	—	—	—	—	—
18	1,542799	1,362676	2,474427	1,491090	2,554362	1,512770	2,573571	1,518939	1,518939	2,588660	1,517888	—	—	—	—	—
19	1,543385	1,363160	2,475569	1,491685	2,555484	1,513520	2,575053	1,519979	1,519979	2,581065	1,521562	—	—	—	—	—
20	1,543793	1,363573	2,476630	1,492287	2,556419	1,514137	2,576254	1,520811	1,520811	2,582774	1,522821	—	—	—	—	—

$b_n = 0,3 \text{ и } b_0 = 0,26; (\Gamma_{\max} = 0,26); 1/r = 1,696744$

$n \setminus k_i$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,534060	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,301956	0,905429	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,461190	1,358299	1,538015	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	2,523202	1,454966	2,306838	0,907261	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	2,549212	1,484334	2,470700	1,360587	1,540502	—	—	—	—	—	—	—	—
16	2,563244	1,503657	2,527310	1,457091	2,309975	0,908451	—	—	—	—	—	—	—
17	2,571709	1,511845	2,553000	1,490376	2,473631	1,362103	1,542167	—	—	—	—	—	—
18	2,577237	1,516770	2,567783	1,505450	2,529998	1,458516	2,312111	0,909269	—	—	—	—	—
19	2,581065	1,519979	2,575053	1,519520	2,555484	1,491685	2,475649	1,363160	1,543335	—	—	—	—
20	2,583838	1,522194	2,580426	1,518362	2,669104	1,509962	2,531859	1,459519	2,313633	0,909854	—	—	—

Продолжение табл. 9.5

 $b_n = 0,4 \text{ и } b_0 = 0,3; (\Gamma_{\max} = 0,3); 1/r = 1,843511$

$n \setminus k_i$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}
2	1,298854	0,704554	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,490880	1,118002	1,490880	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	1,561990	1,222520	2,253730	0,848917	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	1,600610	1,265209	2,431458	1,263209	1,600610	—	—	—	—	—	—	—	—
6	1,620321	1,283290	2,498586	1,385340	2,365760	0,878931	1,294720	1,632332	—	—	—	—	—
7	1,632332	1,294720	2,531374	1,389206	2,531374	1,294720	1,632332	—	—	—	—	—	—
8	1,640178	1,301867	2,550013	1,405489	2,591035	1,383237	2,400006	0,889702	—	—	—	—	—
9	1,645581	1,306644	2,561706	1,444666	2,619316	1,414666	2,561706	1,386644	1,645581	—	—	—	—
10	1,649457	1,310000	2,569566	1,420399	2,655102	1,429393	2,618523	1,393843	2,415001	0,884735	—	—	—
11	1,652330	1,312451	2,575124	1,424248	2,644903	1,437541	2,644903	1,424248	2,575124	1,312451	—	—	—
12	1,654520	1,314297	2,579209	1,426967	2,651455	1,442567	2,659389	1,438263	2,630636	1,389074	—	—	—
13	1,656227	1,315722	2,582306	1,428974	2,658080	1,445911	2,668270	1,445911	2,656080	1,428974	—	—	—
14	1,657582	1,316846	2,584713	1,430497	2,659481	1,448264	2,674153	1,450576	2,646980	1,4262617	—	—	—
15	1,658867	1,317749	2,586623	1,431683	2,662064	1,449991	2,678276	1,453652	2,678276	1,449991	—	—	—
16	1,659573	1,318484	2,588166	1,432627	2,664079	1,451300	2,681295	1,455800	2,683785	1,454449	—	—	—
17	1,660315	1,319092	2,589430	1,433592	2,665683	1,452321	2,683579	1,457369	2,687619	1,457369	—	—	—
18	1,660939	1,319599	2,590480	1,434021	2,666984	1,453133	2,685357	1,458553	2,690410	1,459394	—	—	—
19	1,661466	1,320028	2,591362	1,434544	2,668055	1,453792	2,686771	1,459473	2,692514	1,460865	—	—	—
20	1,661916	1,320394	2,592109	1,434985	2,668948	1,454334	2,687917	1,460204	2,694145	1,461971	—	—	—

$b_{II} = 0,4 \partial\delta$; ($|\Gamma|_{\max} = 0,3$); $1/r = 1,843511$

Продолжение табл. 9.5

$\frac{g_i}{n}$	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	1,652330	0,897482	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2,422931	1,315722	1,656227	-	-	-	-	-	-	-
13	2,582306	1,402059	2,427620	0,899143	-	-	-	-	-	-
14	2,63737	1,4931683	2,558623	1,317749	1,658676	-	-	-	-	-
15	2,662064	1,445111	2,61065	1,403932	2,430640	0,900222	-	-	-	-
16	2,675889	1,45321	2,663683	1,433392	2,589430	1,319092	1,660315	-	-	-
17	2,683579	1,456653	2,678868	1,46887	2,643634	1,405188	2,432697	0,900963	-	-
18	2,688859	1,49473	2,668771	1,453792	2,668055	1,434544	2,591362	1,320028	1,661466	-
19	2,692514	1,461420	2,691903	1,458042	2,681083	1,447752	2,645412	1,406070	2,434160	0,901493
20	2,695161	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение табл. 9.5

$\frac{g_i}{n}$	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	1,402945	0,707084	1,996680	1,596332	-	-	-	-	-	-
3	1,596332	1,996680	2,366170	0,841859	-	-	-	-	-	-
4	1,670357	1,925459	1,229610	2,540881	1,229510	1,705521	-	-	-	-
5	1,705820	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1,725415	1,247851	2,606419	1,313635	2,475594	0,869608	1,737342	-	-	-
7	1,737342	1,558218	2,638345	1,344312	2,638345	1,258218	1,509318	0,879545	-	-
8	1,75130	1,264696	2,656470	1,359023	2,696747	1,338861	2,667833	1,269024	1,750490	-
9	1,750490	1,289024	2,667833	1,367303	2,723956	1,357303	2,723159	1,348435	2,523937	0,884184
10	1,754335	1,272064	2,675467	1,372472	2,739276	1,380595	-	-	-	-
11	1,757185	1,274283	2,680863	1,375940	2,748780	1,387940	2,748780	1,375940	2,680863	1,274283
12	1,753556	1,275954	2,684828	1,378393	2,755132	1,392127	2,767831	1,388586	2,734906	1,353153
13	1,761048	1,277244	2,687834	1,380198	2,759613	1,395478	2,771440	1,365478	2,759613	1,380198
14	1,762392	1,278261	2,690170	1,381559	2,762909	1,397596	2,777140	1,389678	2,773008	1,392506
15	1,763477	1,279078	2,692024	1,382638	2,765412	1,399149	2,781134	1,402447	2,781134	1,399149
16	1,764365	1,279744	2,693521	1,383488	2,767363	1,400328	2,784056	1,404380	2,786469	1,403154
17	1,765100	1,280294	2,694748	1,384177	2,768916	1,401246	2,786268	1,405790	2,790182	1,405790
18	1,765718	1,280753	2,695766	1,384473	2,770176	1,401977	2,787989	1,406856	2,792884	1,407614
19	1,766241	1,281141	2,696621	1,385214	2,771213	1,402570	2,789358	1,407684	2,794920	1,408937
20	1,766688	1,281471	2,697347	1,385611	2,772078	1,403058	2,790468	1,408341	2,796499	1,409931

$b_n = 0,5 \text{ об} / (\Gamma_{\max} = 0,33); 1/r = 1,984126$

$n \backslash i$	g_i	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	1,757185	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2,531634	0,886715	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	2,687834	1,277244	1,761048	-	-	-	-	-	-	-	-
14	2,741209	1,355845	2,536233	0,888244	-	-	-	-	-	-	-
15	2,765412	1,382638	2,692024	1,279078	1,763477	-	-	-	-	-	-
16	2,778429	1,394750	2,745016	1,357534	2,539174	0,889238	-	-	-	-	-
17	2,786268	1,401246	2,768916	1,384177	2,694748	1,280294	1,765100	-	-	-	-
18	2,791382	1,406146	2,781700	1,396169	2,747505	1,388666	2,541176	0,889920	-	-	-
19	2,794920	1,407684	2,789358	1,402570	2,771213	1,385214	2,696621	1,281141	1,766241	-	-
20	2,797484	1,409435	2,794329	1,406395	2,788845	1,387127	2,749228	1,359463	2,542602	0,890409	-

П р о д о л ж е н и е т а б л . 9.5
 $b_n = 0,6 \text{ об} / (\Gamma_{\max} = 0,36); 1/r = 2,121264$

$n \backslash i$	g_i	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	1,497506	0,705950	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1,592372	1,075173	1,692372	0,832753	-	-	-	-	-	-	-
4	1,766489	1,164101	2,469363	1,98290	1,801907	-	-	-	-	-	-
5	1,801907	1,198290	2,642050	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1,821451	1,219082	2,706484	1,275884	2,577508	0,858663	1,224616	1,833340	-	-	-
7	1,833340	1,224616	2,737807	1,304063	2,737807	1,299024	2,610360	0,87925	-	-	-
8	1,841099	1,230569	2,755571	1,317548	2,794866	1,325131	2,821786	1,267072	1,24545	1,846438	-
9	1,846438	1,234545	2,766702	1,325131	2,821786	1,325131	2,821786	1,337306	2,820987	1,307795	2,624717
10	1,850266	1,237337	2,774177	1,329862	2,836778	1,337306	2,836778	2,820987	1,307795	2,624717	0,872246
11	1,853104	1,239375	2,779459	1,330305	2,846074	1,344027	2,846074	1,330305	2,833035	2,779459	1,239375
12	1,855266	1,240909	2,783341	1,335279	2,852284	1,348668	2,852284	1,335279	2,858118	2,834616	1,312115
13	1,856950	1,242094	2,786283	1,336929	2,856664	1,350921	2,868236	1,336929	2,856664	2,856664	1,336929
14	1,858287	1,243028	2,788559	1,338184	2,859885	1,352957	2,875805	1,354762	2,869764	1,348199	1,348199
15	1,859367	1,243777	2,790383	1,339160	2,862331	1,354277	2,877708	1,357292	2,877708	1,354277	-
16	1,860251	1,244388	2,791848	1,339938	2,864227	1,355554	2,880563	1,359059	2,882921	1,357947	-
17	1,860984	1,244893	2,793048	1,340566	2,865555	1,356193	2,882724	1,360348	2,885459	2,885459	-
18	1,861599	1,245314	2,794045	1,341085	2,866987	1,356860	2,884405	1,361321	2,889189	1,362013	-
19	1,862119	1,24567	2,794881	1,341516	2,867999	1,357402	2,885742	1,362078	2,89177	1,363222	-
20	1,862563	1,245974	2,795591	1,341879	2,868844	1,357848	2,886825	1,362678	2,892719	1,364131	-

$n \backslash g_i$	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,853104	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,632294	0,874603	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,786283	1,242094	1,8856950	—	—	—	—	—	—	—
14	2,833639	1,311580	2,636787	0,876027	—	—	—	—	—	—
15	2,862231	1,339160	2,790383	1,243777	1,859367	—	—	—	—	—
16	2,875061	1,350251	2,842360	1,316125	2,6399674	0,876953	—	—	—	—
17	2,882724	1,356193	2,865755	1,340568	2,793048	1,244893	1,860984	—	—	—
18	2,887721	1,359758	2,878258	1,351547	2,844794	1,317161	2,641639	0,877588	—	—
19	2,891177	1,362078	2,885742	1,357402	2,866799	1,341516	2,794881	1,245671	1,862119	—
20	2,893679	1,363678	2,889597	1,360900	2,880351	1,352423	2,846477	1,317390	2,643038	0,878043

Продолжение табл. 9.5

$n \backslash g_i$	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,585248	0,702523	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,781692	1,053999	1,781692	—	—	—	—	—	—	—
4	1,856024	1,137169	2,5666029	0,822521	—	—	—	—	—	—
5	1,891473	1,169004	2,737369	1,169004	1,891473	—	—	—	—	—
6	1,911014	1,184612	2,801025	1,241311	2,673083	0,846891	1,93466	1,922894	—	—
7	1,9222894	1,193466	2,831917	1,267458	2,831917	1,193466	1,262759	2,705533	0,8555590	—
8	1,930645	1,198993	2,849423	1,279950	2,888214	1,2888214	2,869668	2,860386	1,902683	1,935977
9	1,935977	1,202683	2,863386	1,286968	2,914730	1,286968	2,913927	1,270880	2,719704	0,859647
10	1,939800	1,205273	2,867746	1,291345	2,929485	1,298240	2,997254	2,972549	2,872947	1,207163
11	1,942634	1,207163	2,872947	1,294280	2,938630	1,304458	2,938630	1,304458	2,942280	1,274878
12	1,944791	1,208886	2,875769	1,296355	2,944738	1,308286	2,952153	1,304999	2,925231	1,297881
13	1,946473	1,209685	2,879664	1,297881	2,949045	1,310831	2,9560431	1,310831	2,949045	1,308312
14	1,947808	1,210651	2,881915	1,299040	2,952212	1,312619	2,966907	1,314380	2,961933	1,313932
15	1,948885	1,211246	2,8833700	1,299944	2,954616	1,313932	2,969743	1,316719	2,969743	1,313932
16	1,949767	1,211813	2,885141	1,300663	2,956490	1,314927	2,972549	1,318352	2,974868	1,317324
17	1,950499	1,212281	2,889322	1,301244	2,957983	1,315702	2,974674	1,319543	2,978434	1,319543
18	1,951112	1,212672	2,887503	1,301723	2,959192	1,316319	2,977632	1,320442	2,981028	1,321082
19	1,951631	1,213002	2,888126	1,302121	2,960188	1,316819	2,977639	1,321141	2,982982	1,322199
20	1,952075	1,213284	2,888825	1,302456	2,961019	1,317231	2,978704	1,321695	2,984498	1,323038

18*

n	ε_i	ε_{11}	ε_{12}	ε_{13}	ε_{14}	ε_{15}	ε_{16}	ε_{17}	ε_{18}	ε_{19}	ε_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,942634	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,727180	0,861859	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,879664	1,209685	1,94673	—	—	—	—	—	—	—	—
14	2,931292	1,277158	2,731614	0,863195	—	—	—	—	—	—	—
15	2,954616	1,299944	2,883700	0,211246	1,948885	—	—	—	—	—	—
16	2,967139	1,310208	2,934952	1,278588	2,734462	0,86064	1,950499	—	—	—	—
17	2,974674	1,315702	2,957983	1,301244	2,889322	1,212281	2,736400	0,864660	—	—	—
18	2,979585	1,318998	2,970280	1,311405	2,937344	1,279546	2,92121	1,213002	1,951631	—	—
19	2,982982	1,321141	2,977639	1,316819	2,960188	1,302121	2,888126	1,280221	2,737780	0,866086	—
20	2,985442	1,322619	2,982413	1,320052	2,972339	1,312124	2,938899	1,288999	2,739774	0,866086	—

Продолжение табл. 9.5

 $b_n = 0,8 \partial\delta; (|\Gamma|_{\max} = 0,41); 1/r = 2,390897$

n	ε_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}
2	1,667870	0,697592	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,865980	1,033380	1,866980	—	—	—	—	—	—	—	—
4	1,940620	1,111659	2,657859	0,811970	—	—	—	—	—	—	—
5	1,976156	1,141510	2,822343	1,141510	1,976156	—	—	—	—	—	—
6	1,995728	1,156125	2,894452	1,209359	2,764174	0,834719	1,164410	2,793631	0,842938	—	—
7	2,007621	1,164410	2,920336	2,923807	2,922036	1,223935	2,795098	1,173029	2,020714	—	—
8	2,015379	1,165579	2,935355	1,245470	2,977789	1,252019	3,004015	1,262539	1,239974	2,810381	0,846769
9	2,020714	1,173029	2,950198	1,252019	3,004015	1,252019	3,003328	1,259547	2,742778	3,037918	—
10	2,024539	1,175451	2,957476	1,256102	3,018598	1,262539	3,003328	1,259547	2,742778	3,037918	—
11	2,027374	1,177219	2,962617	1,258839	3,027632	1,268337	3,027632	1,258839	2,962617	1,177219	—
12	2,029533	1,178549	2,963394	1,260773	3,033665	1,271986	3,040994	1,268840	3,014376	1,240704	—
13	2,032114	1,179576	2,969256	1,262196	3,037918	1,274278	3,049169	1,274278	3,037918	1,262196	—
14	2,032549	1,180385	2,971480	1,263277	3,041045	1,275945	3,054577	1,277587	3,050561	1,271927	—
15	2,036227	1,181035	2,973245	1,264119	3,043420	1,277168	3,058364	1,279767	3,058364	1,277168	—
16	2,034510	1,181564	2,974689	1,264788	3,045270	1,278095	3,061135	1,281288	3,063425	1,280330	—
17	2,035241	1,182002	2,975837	1,265331	3,046744	1,278817	3,063231	1,282397	3,066945	1,282397	—
18	2,035855	1,182367	2,976806	1,265777	3,047338	1,279392	3,064862	1,283235	3,069505	1,283235	—
19	2,036374	1,182676	2,977619	1,266148	3,048821	1,279858	3,066159	1,283886	3,071434	1,284871	—
20	2,036817	1,182939	2,977831	1,266460	3,049741	1,280241	3,067210	1,284402	3,072930	1,285653	—

$b_n = 0,8 \text{ дБ}; (\Gamma_{\max} = 0,4); 1/r = 2,390897$

$n \backslash g_i$	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,027374	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,817786	0,848858	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,962956	1,179576	2,031214	—	—	—	—	—	—	—
14	3,020362	1,242832	2,822177	0,850119	—	—	—	—	—	—
15	3,043420	1,264119	2,973245	1,181035	2,033627	—	—	—	—	—
16	3,055791	1,273694	3,023977	1,244165	2,824997	0,850939	—	—	—	—
17	3,063231	1,278817	3,046744	1,265331	2,975837	1,182002	2,035241	—	—	—
18	3,068081	1,28889	3,058892	1,274810	3,026339	1,245059	2,826916	0,881501	—	—
19	3,071434	1,283886	3,066159	1,279858	3,048921	1,266648	2,977619	1,182676	2,036374	—
20	3,073862	1,285263	3,070871	1,282870	3,060924	1,275564	3,027974	1,245688	2,828283	0,851904

Продолжение табл. 9.5
 $b_n = 0,9 \text{ дБ}; (\Gamma_{\max} = 0,43); 1/r = 2,524621$

$n \backslash g_i$	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,746520	0,691645	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,946371	1,013399	1,946371	2,745985	0,800498	2,057057	—	—	—	—
4	2,021391	1,115596	2,915984	1,115596	2,057057	—	—	—	—	—
5	2,057057	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	2,076687	1,129361	2,978720	1,179613	2,851824	0,822396	1,137159	2,088611	—	—
7	2,088611	1,137159	3,009087	1,202609	3,009087	1,064451	2,885799	0,830196	—	—
8	2,096386	1,142023	3,026274	1,213568	3,064461	1,198445	2,883703	1,145269	2,101733	—
9	2,101733	1,152669	3,037030	1,219717	3,094477	1,219717	3,037030	1,205563	2,897747	0,833831
10	2,105565	1,147547	3,044248	1,223549	3,104935	1,223549	3,089666	1,205563	—	—
11	2,108405	1,149209	3,049347	1,226118	3,113890	1,235039	3,113890	1,226118	3,049347	1,149209
12	2,110568	1,150460	3,053092	1,227333	3,119868	1,238388	3,119868	1,227333	3,100735	1,209666
13	2,112253	1,151426	3,055930	1,229268	3,124083	1,240613	3,124083	1,240613	3,124083	1,229268
14	2,113590	1,152187	3,058135	1,230282	3,127181	1,242177	3,140593	1,243717	3,136703	1,238406
15	2,114570	1,152798	3,059884	1,231072	3,129533	1,243324	3,144345	1,245762	3,144345	1,243324
16	2,115554	1,153296	3,061297	1,231701	3,13366	1,244193	3,147090	1,247188	3,149359	1,246390
17	2,116287	1,153707	3,062454	1,232209	3,132826	1,244870	3,149166	1,248229	3,152845	1,248229
18	2,116901	1,154051	3,063414	1,232628	3,134009	1,2450781	3,149019	3,153381	1,249674	1,250449
19	2,117421	1,154341	3,064221	1,232976	3,134983	1,2458406	3,149624	3,157292	1,250449	1,251582
20	2,117866	1,154588	3,064905	1,233269	3,135795	1,246206	3,153106	1,250109	3,158772	1,251582

$b_n = 0,9 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,43); 1/r = 2,524621$

n	g_l	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,108405	2,905103	0,835813	1,151426	2,112953	—	—	—	—	—	—
12	2,905103	0,835813	1,151426	2,909464	0,837609	—	—	—	—	—	—
13	3,055930	1,211068	2,112953	—	—	—	—	—	—	—	—
14	3,106668	1,231072	3,059884	1,152798	2,114570	—	—	—	—	—	—
15	3,129533	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	3,141794	1,240063	3,110249	1,212315	2,912264	0,837787	—	—	—	—	—
17	3,149166	1,244870	3,132826	1,232209	3,062454	1,153707	2,116287	—	—	—	—
18	3,153970	1,247752	3,144865	1,241110	3,112590	1,213154	2,914770	0,838320	—	—	—
19	3,157292	1,249624	3,152065	1,25846	3,134983	1,232976	3,064221	1,153341	2,117421	—	—
20	3,159696	1,250917	3,156734	1,248673	3,146878	1,241817	3,114420	1,213744	2,915527	0,838702	—

 $b_n = 1,0 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,45); 1/r = 2,659864$

n	g_l	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,822010	0,685002	2,023761	—	—	—	—	—	—	—	—
3	2,023761	0,994083	2,831204	0,789187	—	—	—	—	—	—	—
4	2,09930	1,054417	2,831204	0,991082	2,134960	—	—	—	—	—	—
5	2,134960	1,091082	3,061009	1,091082	2,134960	—	—	—	—	—	—
6	2,154669	1,104108	3,063507	1,151754	2,936774	0,810067	2,166636	—	—	—	—
7	2,166636	1,11484	3,093728	1,173491	3,093728	1,111484	2,968624	0,817500	—	—	—
8	2,174438	1,116082	3,110823	1,183839	3,148849	1,169443	3,121519	1,119151	2,179802	—	—
9	2,179802	1,119151	3,121519	1,189643	3,174720	1,189643	3,173904	1,176263	2,982513	0,820962	—
10	2,183647	1,121304	3,128696	1,193259	3,189090	1,193968	3,228247	1,214216	3,228247	1,211918	—
11	2,186496	1,122874	3,133765	1,195682	3,197988	1,204103	3,197988	1,195682	3,133765	1,122874	—
12	2,188665	1,124057	3,137488	1,197394	3,203927	1,207621	3,211150	1,204547	3,184903	1,179688	—
13	2,190355	1,124969	3,140309	1,198654	3,208114	1,203360	3,211978	1,209360	3,208114	1,198554	—
14	2,191898	1,125689	3,142501	1,199610	3,211192	1,210835	3,224520	1,212289	3,220654	1,207778	—
15	2,192780	1,126266	3,144240	1,200355	3,213328	1,211918	3,228247	1,214216	3,228247	1,211918	—
16	2,193666	1,126737	3,145643	1,200948	3,215349	1,212736	3,230972	1,215561	3,233226	1,214714	—
17	2,194402	1,127155	3,146794	1,201428	3,216799	1,213374	3,233034	1,216542	3,236689	1,216542	—
18	2,195017	1,127450	3,147748	1,201822	3,217973	1,213883	3,234637	1,217283	3,239206	1,217810	—
19	2,195539	1,127724	3,148549	1,202151	3,218940	1,214295	3,235912	1,217858	3,241103	1,218730	—
20	2,195984	1,127958	3,149230	1,204247	3,219747	1,214534	3,236946	1,218315	3,242574	1,219421	—

$b_n = 1,0 \partial 6; (\Gamma_{\text{ макс}} = 0,45); 1/r = 2,659864$

n	g_1	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	2,186496	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2,989835	0,822848	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	3,146509	1,124969	2,190355	-	-	-	-	-	-	-	-
14	3,190797	1,181453	2,994177	0,823988	-	-	-	-	-	-	-
15	3,215528	1,200355	3,44240	1,126266	2,192780	-	-	-	-	-	-
16	3,292711	1,208840	3,1944356	1,182634	2,995694	0,821728	-	-	-	-	-
17	3,233034	1,23374	3,216799	1,201428	3,146794	1,127155	2,194402	-	-	-	-
18	3,237804	1,216092	3,228761	1,208827	3,196681	1,183425	2,998861	0,825236	-	-	-
19	3,241103	1,217858	3,235912	1,214295	3,218840	1,202151	3,148549	1,127724	2,195339	-	-
20	3,243491	1,219076	3,240549	1,216950	3,230759	1,210494	3,198290	1,183982	3,000212	0,825399	-

 $b_n = 1,5 \partial 6; (\Gamma_{\text{ макс}} = 0,54); 1/r = 3,352037$

n	g_1	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	2,168882	0,647036	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2,380420	0,966861	2,380420	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2,458693	0,963625	3,230093	0,733495	-	-	-	-	-	-	-
5	2,495698	0,94938	3,401779	0,984938	2,495698	-	-	-	-	-	-
6	2,516008	0,995311	3,464376	1,033518	3,336304	0,750593	-	-	-	-	-
7	2,528327	1,001173	3,494536	1,050761	3,494536	1,001173	2,528327	-	-	-	-
8	2,536351	1,004825	3,511567	1,058940	3,549592	1,047596	3,398197	0,756662	-	-	-
9	2,541866	1,007260	3,522213	1,0633519	3,575340	1,065519	3,522213	1,007260	2,541866	-	-
10	2,545817	1,008968	3,529350	1,066370	3,589619	1,070880	3,574498	1,052900	3,382085	0,759486	-
11	2,58743	1,010214	3,534390	1,068279	3,598450	1,074928	3,598450	1,068279	3,534390	1,010214	-
12	2,55997	1,011151	3,538091	1,069627	3,60343	1,077414	3,611519	1,075274	3,58546	1,055509	-
13	2,582708	1,011874	3,540895	1,070619	3,608495	1,079025	3,619502	1,079065	3,608495	1,070619	-
14	2,584085	1,012445	3,543070	1,071372	3,611545	1,080225	3,624777	1,081370	3,620941	1,077422	-
15	2,555197	1,012900	3,544799	1,071958	3,613860	1,081076	3,628470	1,082886	3,628470	1,081076	-
16	2,556107	1,013275	3,546193	1,072424	3,615665	1,0811720	3,631169	1,083944	3,63304	1,083277	-
17	2,556862	1,013584	3,547336	1,072800	3,617101	1,082222	3,63312	1,084715	3,63634	1,084715	-
18	2,557495	1,013840	3,548285	1,073112	3,618266	1,082621	3,634801	1,082996	3,639529	1,085715	-
19	2,558030	1,014058	3,549080	1,073371	3,619224	1,082945	3,636064	1,085749	3,641208	1,086434	-
20	2,558488	1,014243	3,549757	1,073588	3,620023	1,083212	3,637087	1,086107	3,642664	1,086977	-

$n \setminus i$	g_1	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,548743	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	3,399400	0,761024	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	3,540895	1,011874	2,552708	—	—	—	—	—	—	—	—
14	3,591263	1,056995	3,398738	0,761952	—	—	—	—	—	—	—
15	3,613860	1,071958	3,544799	1,012900	2,553197	—	—	—	—	—	—
16	3,655952	1,078651	3,594792	1,057926	3,396521	0,762555	—	—	—	—	—
17	3,633212	1,082222	3,617101	1,072860	3,547336	1,013584	2,556862	—	—	—	—
18	3,637940	1,084360	3,628973	1,079427	3,59098	1,058550	3,398417	0,762969	—	—	—
19	3,641208	1,085749	3,636664	1,082945	3,619224	1,073371	3,549080	1,014058	2,558930	—	—
20	3,643572	1,086706	3,640657	1,085042	3,639952	1,079951	3,598694	1,058989	3,399765	0,763265	—

Продолжение табл. 9.5

 $b_n = 2,0 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,61); 1/r = 4,095708$

$n \setminus i$	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	2,488259	0,607527	—	—	—	—	—	—	—	—
3	2,710815	0,836380	2,710815	—	—	—	—	—	—	—
4	2,732592	0,880548	3,606474	0,681832	—	—	—	—	—	—
5	2,831149	0,898429	3,782880	0,898429	2,831149	—	—	—	—	—
6	2,850284	0,907111	3,846821	0,939231	3,715270	0,696406	—	—	—	—
7	2,865093	0,912013	3,877559	0,953529	3,877559	0,912013	2,865093	—	—	—
8	2,873433	0,915065	3,894899	0,960443	3,937300	0,950969	3,747844	0,701570	—	—
9	2,879162	0,917099	3,905729	0,961254	3,958999	0,964254	3,905729	0,917099	2,879162	—
10	2,883266	0,918525	3,912990	0,966625	3,974411	0,970383	3,959020	0,955386	3,762015	0,703971
11	2,886306	0,919565	3,918114	0,968213	3,983383	0,973748	3,983383	0,968213	3,918114	0,919565
12	2,888620	0,920347	3,921877	0,963333	3,983366	0,975815	3,996659	0,974034	3,970113	0,957556
13	2,890423	0,920951	3,924727	0,970157	3,995581	0,977186	4,004765	0,977186	3,993581	0,970157
14	2,891853	0,921427	3,926940	0,970783	3,996677	0,978150	4,010119	0,979101	4,006224	0,975819
15	2,893307	0,921809	3,928696	0,971270	3,999027	0,978856	4,013867	0,980361	4,013867	0,975856
16	2,893953	0,922120	3,930113	0,971658	4,000859	0,979391	4,016606	0,981239	4,01874	0,980685
17	2,894736	0,922377	3,931274	0,971971	4,002316	0,979808	4,018678	0,981879	4,022385	0,981879
18	2,895393	0,922592	3,932238	0,972229	4,003497	0,980140	4,020289	0,982362	4,024485	0,982306
19	2,895949	0,922773	3,933046	0,972444	4,004469	0,980408	4,021570	0,982737	4,026790	0,983306
20	2,896424	0,922927	3,933764	0,972925	4,005280	0,980630	4,022608	0,983035	4,028257	0,983577

Продолжение табл. 9.5

$n \backslash g_i$	g_1	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,886306	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	3,769480	0,705278	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	3,924727	0,920951	2,890423	—	—	—	—	—	—	—	—
14	3,976051	0,958792	3,773901	0,706067	—	—	—	—	—	—	—
15	3,99027	0,971270	3,928696	0,921809	2,893007	—	—	—	—	—	—
16	4,011308	0,976840	3,979634	0,959367	3,777640	0,706579	—	—	—	—	—
17	4,018678	0,979808	4,002316	0,971971	3,931274	0,923377	2,894736	—	—	—	—
18	4,033475	0,981584	4,014373	0,977484	3,981974	0,960086	3,778672	0,706931	—	—	—
19	4,026790	0,982737	4,021570	0,980408	4,004469	0,972444	3,933046	0,922773	2,895949	—	—
20	4,029189	0,983532	4,026230	0,982150	4,016380	0,977919	3,983594	0,960451	3,780047	0,707183	—

Продолжение табл. 9.5

$n \backslash g_i$	g_1	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	2,796378	0,569543	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	3,030935	0,768305	3,030935	—	—	—	—	—	—	—	—
4	3,116706	0,809833	3,976169	0,634784	—	—	—	—	—	—	—
5	3,157071	0,825267	4,159002	0,825267	3,157071	—	—	—	—	—	—
6	3,179196	0,832750	4,225000	0,860512	4,086689	0,647507	—	—	—	—	—
7	3,192567	0,836971	4,256681	0,872999	4,256681	0,886971	3,192567	—	—	—	—
8	3,201282	0,839597	4,274537	0,878753	4,314562	0,870601	4,122310	0,652010	—	—	—
9	3,207269	0,841347	4,285687	0,880295	4,341530	0,882025	4,285687	0,841347	3,207269	—	—
10	3,211557	0,842574	4,293159	0,884059	4,356459	0,887287	4,346613	0,874394	4,136923	0,654102	—
11	3,214732	0,843469	4,298432	0,885521	4,365684	0,890174	4,365684	0,885421	4,298432	0,843469	—
12	3,217149	0,844142	4,302203	0,886382	4,371834	0,891946	4,379337	0,890416	4,352018	0,873256	—
13	3,219030	0,844662	4,305234	0,887089	4,376165	0,893122	4,387668	0,893122	4,376165	0,887089	—
14	3,220525	0,845071	4,307512	0,887625	4,379348	0,893948	4,393171	0,894764	4,389166	0,891948	—
15	3,221730	0,845399	4,309316	0,888043	4,381762	0,894553	4,397020	0,895844	4,397020	0,894553	—
16	3,222717	0,845667	4,310774	0,888376	4,382643	0,895012	4,399835	0,896596	4,402166	0,896121	—
17	3,223540	0,845888	4,311969	0,888644	4,385142	0,895369	4,401964	0,897145	4,405743	0,897145	—
18	3,224223	0,846072	4,312962	0,888865	4,386357	0,895653	4,403620	0,897558	4,408443	0,897853	—
19	3,2244802	0,846228	4,313793	0,888049	4,387355	0,895884	4,404935	0,897880	4,410300	0,898368	—
20	3,225297	0,846361	4,314498	0,888205	4,388187	0,896074	4,406000	0,898135	4,411815	0,898574	—

n	g_i	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{10}	g_{11}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	3,214732	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	4,144625	0,655241	0,846662	3,219030	—	—	—	—	—	—	—	—
13	4,305334	0,846662	4,309316	0,845399	3,221730	—	—	—	—	—	—	—
14	4,368120	0,877317	4,149185	0,655928	4,877982	4,152110	0,656375	—	—	—	—	—
15	4,381762	0,888043	4,393289	0,88644	4,311969	0,845688	3,223540	—	—	—	—	—
16	4,393289	0,892824	4,361804	0,885142	0,88644	4,364210	0,873427	4,154104	0,656681	—	—	—
17	4,401964	0,895369	4,385142	0,885142	0,88644	4,387355	0,889049	4,313793	0,846228	3,224802	—	—
18	4,406895	0,896892	4,397539	0,893375	4,364210	0,889049	4,313793	0,846228	3,224802	—	—	—
19	4,410300	0,897880	4,404935	0,895884	4,387355	0,893999	4,393999	0,893749	4,365874	0,878741	4,155519	0,656690
20	4,412762	0,898561	4,409723	0,897377	4,409723	0,897377	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 9.5
 $b_n = 3,0 \partial\delta; (\Gamma_{\max} = 0,71); 1/r = 5,809495$

n	g_i	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
2	3,101446	0,533859	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	3,348931	0,711667	3,34931	0,591981	0,711667	3,481488	—	—	—	—	—	—
4	3,439108	0,74807	4,347275	0,74807	0,74807	0,761883	—	—	—	—	—	—
5	3,481488	0,761883	4,537781	0,761883	0,761883	3,481488	—	—	—	—	—	—
6	3,504682	0,768456	4,606344	0,792901	4,464334	0,603269	—	—	—	—	—	—
7	3,518726	0,772,63	4,639217	0,803770	4,639217	0,772,63	3,518726	—	—	—	—	—
8	3,527865	0,774468	4,657736	0,808900	4,699294	0,801747	4,499280	0,602559	—	—	—	—
9	3,534140	0,776004	4,669295	0,811766	4,727254	0,811766	4,669295	0,776004	3,534140	—	—	—
10	3,538637	0,777081	4,67040	0,813548	4,742724	0,816376	4,726293	0,805070	4,5144390	609113	—	—
11	3,541964	0,777666	4,689505	0,814740	4,752279	0,818904	4,752279	0,814740	4,6825050	777866	—	—
12	3,544499	0,778556	4,686518	0,815581	4,758649	0,820455	4,766424	0,819117	4,7381080	806701	—	—
13	3,546470	0,778912	4,689555	0,816200	4,763134	0,821485	4,775052	0,821485	4,7631340	816200	—	—
14	3,548038	0,779271	4,691916	0,816669	4,766432	0,822207	4,780750	0,8222922	4,7766000	820459	—	—
15	3,549300	0,779559	4,693787	0,817035	4,768931	0,822737	4,784738	0,823866	4,7347380	822737	—	—
16	3,550334	0,77994	4,695297	0,817326	4,770879	0,823139	4,787630	0,8240525	4,790650	824109	—	—
17	3,551192	0,77998	4,696534	0,817562	4,772429	0,823451	4,789854	0,825005	4,7937670	825005	—	—
18	3,551909	0,780150	4,697559	0,817755	4,773684	0,823700	4,791565	0,825568	4,7964560	8252626	—	—
19	3,552519	0,780286	4,698424	0,817916	4,774720	0,823901	4,792930	0,825648	4,7964840	826075	—	—
20	3,553039	0,780403	4,69955	0,818052	4,775583	0,824067	4,794034	0,825872	4,800540	824413	—	—

Продолжение табл. 9.5
 $\delta_{ii} = 3,0 \text{ дБ}; (|\Gamma|_{\max} = 0,71); 1/r = 5,809495$

n	δ_i	δ_{11}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{14}	δ_{15}	δ_{16}	δ_{17}	δ_{18}	δ_{19}	δ_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	3,541964	0,610122	4,522429	0,778912	3,5646470	—	—	—	—	—
11	—	4,744430	0,807630	4,527163	0,610731	—	—	—	—	—	—
12	—	4,768931	0,817035	4,633787	0,779559	3,549300	—	—	—	—	—
13	—	4,782011	0,821222	4,748243	0,808212	4,530199	0,611126	—	—	—	—
14	—	4,789854	0,823451	4,772429	0,817562	4,696534	0,779988	3,551192	—	—	—
15	—	4,794956	0,824784	4,785268	0,821709	4,750733	0,808003	4,532264	0,611198	—	—
16	—	4,795484	0,825648	4,792930	0,823901	4,774220	0,817916	4,698424	0,780286	3,552519	—
17	—	4,801034	0,826244	4,797889	0,825208	4,787405	0,822032	4,752459	0,808876	4,533738	0,6111592
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Параметры элементов схемы рассчитываются по формуле

$$g_k = 2 \sqrt[n]{h} \sin \left[\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right] \quad (9.30)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n).$$

Численные значения g_k для $n = 2 \div 20$ приведены в табл. 9.6 для $b_{ii} = 3 \text{ дБ}$ ($\omega_1 = 1$; $\rho_0 = 1$). Амплитудный множитель h связан с b_{ii} и $|\Gamma|_{\max}$ соотношениями (9.22) и (9.23).

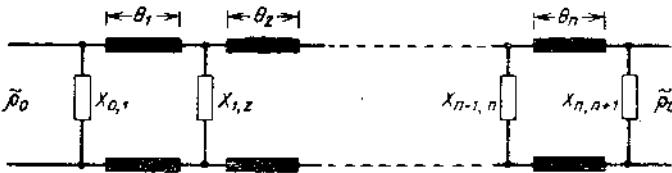


Рис. 9.14. Схема ППФ с непосредственными связями.

В качестве примера реализации прототипных схем (рис. 9.11) рассмотрим полосно-пропускающий СВЧ фильтр с непосредственными связями, составленный из параллельных реактивных сопротивлений (индуктивного характера)

$$X_{0,1}; X_{1,2}; X_{2,3}; \dots; X_{n,n+1},$$

размещенных в однородной линии передачи без потерь с волновым сопротивлением ρ_0 (рис. 9.14).

Расстояние между неоднородностями

$$l_1, l_2, \dots, l_n.$$

их электрические длины

$$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n.$$

Частотные характеристики рассматриваемого ППФ описываются теми же выражениями (9.21), (9.22) и (9.29), но с заменой частотных переменных в соответствии с равенством

$$\omega' = 2 \left(\frac{\Lambda_0 - \Delta}{\Lambda_n - \Lambda_{-n}} \right). \quad (9.31)$$

В линиях передачи без дисперсии приближенно

$$\omega' \approx \frac{2\Delta f}{\frac{f_0}{2\Delta f_{II}}} \quad (9.32)$$

Параметры элементов фильтров-прототипов с максимальной плоской характеристикой

$n \setminus s_i$	s_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}
2	1,412443	1,412443	0,99165	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0,999165	1,988330	0,99165	0,764888	0,617224	0,617225	—	—	—	—	—
4	0,764888	1,846602	1,846602	0,764888	—	—	—	—	—	—	—
5	0,617225	1,617224	1,988999	1,617224	0,617224	—	—	—	—	—	—
6	0,517422	1,413624	1,931045	1,931045	1,413624	0,517422	—	—	—	—	—
7	0,443883	1,265334	1,801293	1,992834	1,801293	1,246534	0,444883	—	—	—	—
8	0,390059	1,110793	1,662419	1,960957	1,960957	1,662419	1,110793	0,390059	—	—	—
9	0,347200	0,999722	1,531663	1,878863	1,999444	1,878863	1,531663	0,999722	0,347200	—	—
10	0,312791	0,967754	1,413859	1,781567	1,974882	1,974882	1,781567	1,413859	0,907754	0,312791	—
11	0,284565	0,830641	1,309424	1,682124	1,918549	1,995545	1,918549	1,682124	1,309424	0,830641	—
12	0,260998	0,765207	1,217269	1,586376	1,847374	1,982477	1,982477	1,847374	1,586376	1,217269	—
13	0,241027	0,709073	1,135910	1,496733	1,770571	1,941509	1,999615	1,941509	1,770571	1,496733	—
14	0,223889	0,660440	1,063874	1,413961	1,693145	1,887429	1,987069	1,987069	1,887429	1,693145	—
15	0,209022	0,617931	0,999833	1,338038	1,617764	1,826786	1,955969	1,999666	1,955969	1,826786	—
16	0,196004	0,580479	0,942646	1,266588	1,545779	1,763567	1,913581	1,990053	1,990053	1,913581	—
17	0,184509	0,547245	0,891345	1,205092	1,477800	1,700184	1,864669	1,990053	1,990053	1,864669	—
18	0,174287	0,517566	0,845119	1,146993	1,414017	1,638077	1,812364	1,931584	1,931584	1,812364	—
19	0,165137	0,490906	0,803285	1,093752	1,353485	1,578073	1,758716	1,891385	1,972663	1,989737	—
20	0,156899	0,466832	0,765271	1,044867	1,298734	1,520622	1,705067	1,847528	1,944997	1,993585	—

Продолжение табл. 9.6

 $b_n = 3,0 \partial 6; (\Gamma_{\max} = 0,71)$

$n \setminus s_i$	s_i	ϵ_{11}	ϵ_{12}	ϵ_{13}	ϵ_{14}	ϵ_{15}	ϵ_{16}	ϵ_{17}	ϵ_{18}	ϵ_{19}	ϵ_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	0,284565	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0,755207	0,260998	0,241027	0,709073	0,60440	0,223889	0,617331	0,209022	—	—	—
13	1,35910	1,063874	1,063874	0,60440	0,999833	0,617331	0,209022	—	—	—	—
14	1,413961	1,338038	1,338038	0,999833	—	—	—	—	—	—	—
15	1,617764	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	1,765567	1,545779	1,268588	0,942646	0,580479	0,942646	0,580479	0,196004	—	—	—
17	1,864669	1,700184	1,477800	1,205092	0,891345	0,891345	0,891345	0,184509	—	—	—
18	1,931584	1,812364	1,638077	1,414017	1,146993	1,146993	0,851119	0,517566	0,174287	—	—
19	1,972463	1,891385	1,758716	1,578073	1,353485	1,353485	1,093752	0,803285	0,490906	0,165137	—
20	1,993585	1,944997	1,847528	1,705067	1,520622	1,520622	1,298734	1,044867	0,765271	0,466832	0,158999

Обозначения ясны из рис. 9.15, причем Λ_0 соответствует f_0 , Λ_n — частоте f_n , а Λ_{-n} — частоте f_{-n} .

Расчетные формулы¹ [4]:

$$X_{k, k+1} = \frac{x_{k, k+1}}{\tilde{g}_0} = \frac{\frac{L}{\sqrt{g_k g_{k+1}}}}{1 - \frac{L^2}{g_k g_{k+1}}}, \quad (9.33)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, n$,

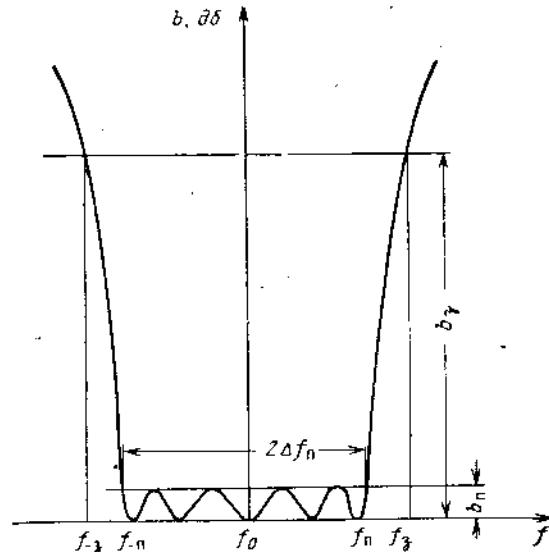


Рис. 9.15. Частотная характеристика ППФ с непосредственными связями.

где

1) для широких полос пропускания

$$L = \frac{\pi}{2\omega_1} \left(\frac{\Lambda_n - \Lambda_{-n}}{\Lambda_n + \Lambda_{-n}} \right); \quad (9.34)$$

2) для узких полос пропускания

$$L = \frac{\pi}{2\omega_1} \left(\frac{\Lambda_0}{\lambda_0} \right)^2 \frac{2\Delta f_n}{f_0} \quad (9.35)$$

¹ Приближенное выражение в [1] отличается знаменателем, равным единице.

Параметры граничных элементов прототипной схемы связаны с L равенствами

$$g_0 = L; \quad g_{n+1} = \frac{L}{r}. \quad (9.36)$$

Остальные значения g_k находятся по табл. 9.5—9.6.
Вследствие симметричной структуры фильтра

$$X_{k, k+1} = X_{n-k, n+1-k} \quad (9.37)$$

электрические длины отрезков линии между неоднородностями¹

$$\theta_k = \pi - \frac{1}{2} [\arctg(2X_{k-1, k}) + \arctg(2X_{k, k+1})], \quad (9.38)$$

$$\theta_k = \theta_{n+1-k}. \quad (9.39)$$

Длины соединительных отрезков линии

$$l_k = \frac{\theta_k \Delta_0}{2\pi}. \quad (9.40)$$

П р и м е р .

Рассчитать двухзвеный фильтр с непосредственными связями, образованный параллельными проводимостями в линии передачи без дисперсии. Фильтр должен обладать максимально плоской частотной характеристикой и полосой пропускания на уровне $|\Gamma|_{\max} = 0,2$, равной 5%.

1. Амплитудный множитель определяется по формуле (9.23)

$$h = \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{1 - 0,2^2}} = 0,204.$$

2. Параметры элементов прототипных схем [см. (9.30)]

$$g_1 = g_2 = \sqrt{0,204} \sqrt{2} = 0,64.$$

3. Коэффициент L [см. (9.35)]

$$L = \frac{\pi}{2} \frac{2\Delta f_n}{f_0} = \frac{\pi}{2} 0,05 = 0,0785.$$

4. Сопротивления неоднородностей в линии передачи [см. (9.33), (9.36)]

$$X_{0,1} = \frac{\frac{L}{\sqrt{g_0 g_1}}}{1 - \frac{L^2}{g_0 g_1}} = \frac{\frac{0,0785}{\sqrt{0,0785 \cdot 0,64}}}{1 - \frac{(0,0785)^2}{0,0785 \cdot 0,64}} = 0,3993,$$

¹ Выражение (9.38) может быть приведено к (9.9).

$$X_{1,2} = \frac{\frac{L}{\sqrt{g_1 g_2}}}{1 - \frac{L^2}{g_1 g_2}} = \frac{\frac{0,0785}{0,64}}{1 - \left(\frac{0,0785}{0,64}\right)^2} = 0,1246,$$

откуда¹

$$B_{0,1} = \frac{1}{X_{0,1}} = 2,5044,$$

$$B_{1,2} = \frac{1}{X_{1,2}} = 8,0269;$$

по данным проводимостям определяются геометрические размеры индуктивных неоднородностей (см. § 4.5).

5. Электрические длины соединительных отрезков см. (9.38)

$$\theta_1 = \theta_2 = 0 = \pi - \frac{1}{2} [\arctg(2X_{0,1}) + \arctg(2X_{1,2})] =$$

$$= \pi - \frac{1}{2} [\arctg(2 \cdot 0,3993) + \arctg(2 \cdot 0,1246)] = 2,679;$$

для сравнения см. пример расчета, приведенный в § 9.3, выполненный иным методом.

ЛИТЕРАТУРА

- Саусорт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи. Изд-во «Советское радио», 1955.
- Young L. The Quarter-Wave Transformers Prototype Circuit. Trans. IRE, 1960, Sept., v. MTT-8.
- Прохорова Н. И., Фельдштейн А. Л. Общий метод расчета фильтров с непосредственными связями. «Радиотехника», 1967 № 6.
- Sohn S. B. Direct-coupled-resonator Filters. Proc. IRE, 1957, № 2.
- Рибле Р. Н. Общий синтез четвертьволновых трансформаторов полного сопротивления. Вопросы радиолокационной техники, 1957, 4 (40).
- Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. Госэнергоиздат, 1963.

¹ Знаки у проводимостей отрицательные.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ФИЛЬТРЫ НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

10.1. ИСХОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В фильтрах на связанных линиях резонансные отрезки передающей линии связаны между собой распределенной электрической и магнитной связью. Наиболее распространенный вариант реализации — фильтры на связанных полосковых линиях; такие фильтры малогабаритны и просты по конструкции, особенно в печатном варианте. Различают фильтры на связанных линиях с четвертьволновыми связями и с непосредственными.

Методы расчета фильтров с непосредственными связями на связанных линиях [1] имеют два направления. В первом из них прототипом является ступенчатый переход [2, 3], во втором — фильтр нижних частот, составленный из сосредоточенных (*LC*) элементов [4, 5].

Общие вопросы расчета фильтров СВЧ с четвертьволновыми и непосредственными связями рассмотрены в гл. 8 и 9. Расчет размеров полосковых линий различных типов дан в гл. 5.

10.2. ЗВЕНО ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА (ППФ) НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

Звено полосно-пропускающего фильтра (ППФ) изображено на рис. 10.1¹, а, б. Предполагается, что электрические и магнитные связи в звене уравновешены ($\tilde{r}_0 = r_0^2$, см. гл. 2). Таким образом, звено ППФ является идеальным противона правленным ответвителем с короткозамкнутыми либо разомкнутыми плечами 2 и 3 (рис. 10.2, а, б). Волновая матрица передачи такого звена имеет вид:

$$[T] = \begin{bmatrix} \mp \frac{(\cos \psi + j_p \sin \psi)^2}{j2r \sin \psi} & -\frac{1 - r^2 \sin^2 \psi}{j2r \sin \psi} \\ \frac{1 - r^2 \sin^2 \psi}{j2r \sin \psi} & \pm \frac{(\cos \psi - j_p \sin \psi)^2}{j2r \sin \psi} \end{bmatrix}, \quad (10.1)$$

¹ Изображен лишь внутренний проводник симметричной полосковой линии.

где

$$\psi = \frac{2\pi l}{A};$$

l — длина звена.

Верхние знаки в (10.1) относятся к случаю короткого замыкания, а нижние — холостого хода плеч 2 и 3. Физический смысл величин ρ и r соответствует концепции связанных волн [6]; ρ — собствен-

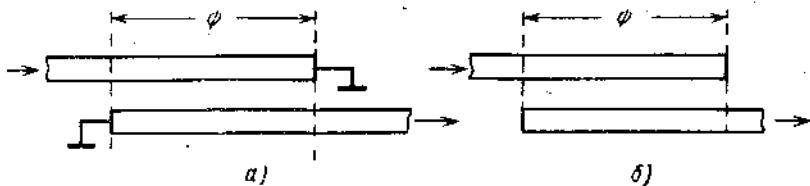


Рис. 10.1. Звено ППФ (внутренний проводник)

а — с короткозамкнутыми плечами; б — с разомкнутыми плечами.

ное волновое сопротивление; r — взаимное волновое сопротивление. Величины ρ и r нормированы по сопротивлению ρ_0 окончательных нагрузок.

Вследствие направленности системы

$$\rho^2 - r^2 = 1. \quad (10.2)$$

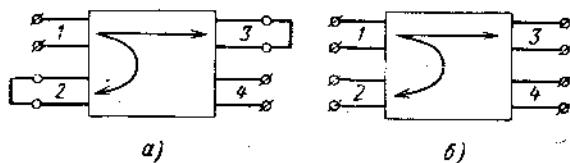


Рис. 10.2. Идеальный противонаправленный ответвитель:

а — с короткозамкнутыми плечами 2 и 3, б — с разомкнутыми плечами 2 и 3.

Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики передаточной функции звена описываются соотношениями

$$|T_{11}|^2 = 1 \left| \frac{\cos^2 \psi + \rho^2 \sin^2 \psi}{2r \sin \psi} \right|^2; \quad (10.3)$$

$$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{Im} T_{11}}{\operatorname{Re} T_{11}} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2\rho \sin \psi \cos \psi}{\cos^2 \psi - \rho^2 \sin^2 \psi} - \frac{\pi}{2}. \quad (10.4)$$

Эти зависимости изображены на рис. 10.3 и 10.4. Простая аппроксимация кривых рис. 10.3 и 10.4 осуществляется прямыми линиями. Уравнения аппроксимирующих прямых

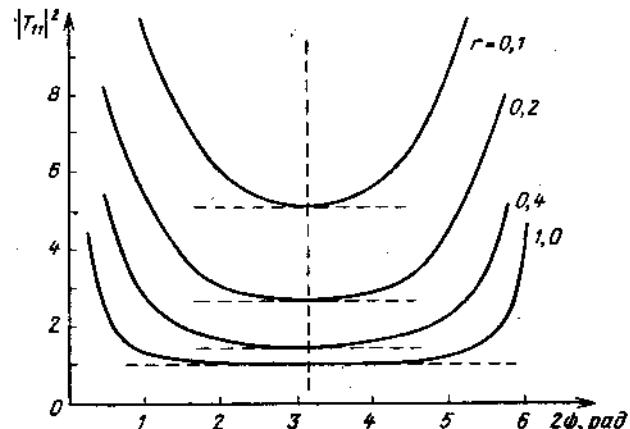


Рис. 10.3. Частотная характеристика модуля коэффициента передачи звена ППФ.

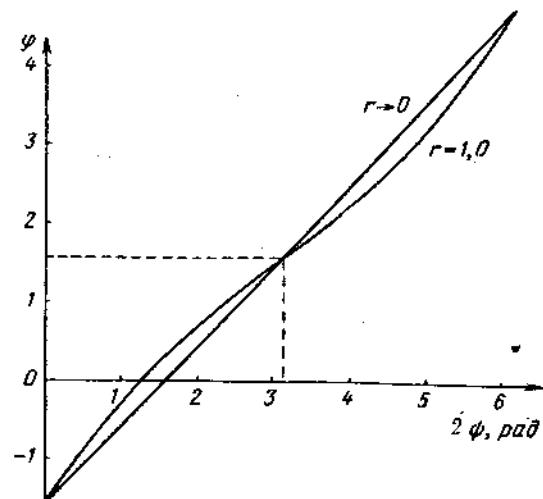


Рис. 10.4. Частотная характеристика фазы коэффициента передачи звена ППФ.

$$\left. \begin{aligned} |T_{11}|^2 &= \text{const}, \\ \varphi &= 2\psi - \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (10.5)$$

Известно (см. гл. 6), что характеристики типа (10.5) имеет звено ступенчатого перехода (рис. 10.5). Отсюда следует возможность применения ступенчатого перехода в качестве прототипа ППФ на связанных линиях.

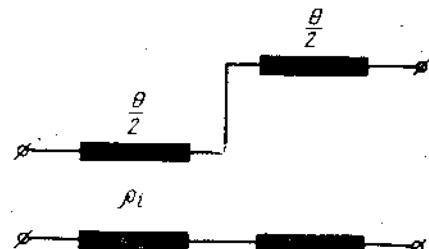


Рис. 10.5. Звено ступенчатого перехода.

10.3. РЕЗОНАТОР ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

Два одинаковых звена ППФ, включенных каскадно (рис. 10.6, а, б), образуют резонатор ППФ на связанных линиях.

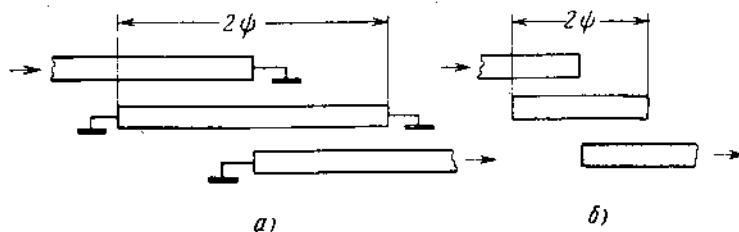


Рис. 10.6. Резонатор ППФ на связанных линиях:
а—с короткозамкнутыми плечами; б—с разомкнутыми плечами.

Возводя в квадрат матрицу (10.1), получаем функцию рабочего затухания такого резонатора

$$|T_{11}|^2 = 1 + \left(\frac{1}{r \sin \psi} - r \sin \psi \right) \frac{1 - r^2}{r^2} \cos^2 \psi. \quad (10.6)$$

Соответствующие частотные характеристики изображены на рис. 10.7; они сходны с характеристиками одиночного LC контура, представленного на рис. 10.8.

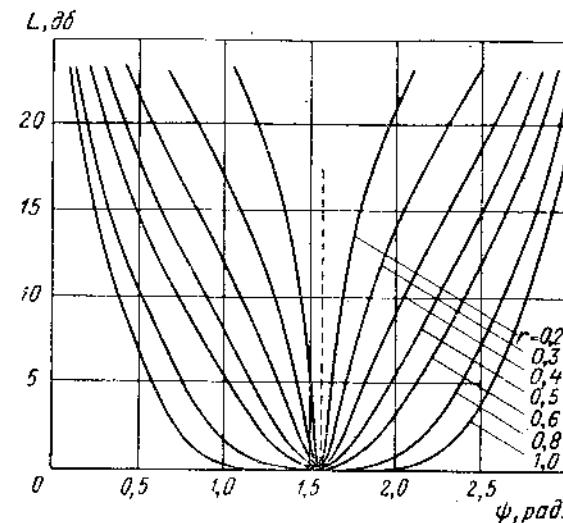


Рис. 10.7. Частотная характеристика рабочего затухания резонатора ППФ на связанных линиях.

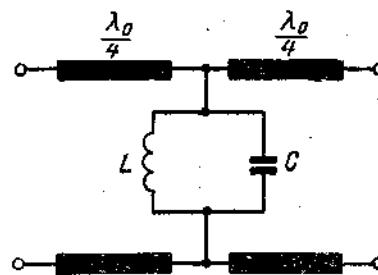


Рис. 10.8. Одиночный LC контур с четвертьволновыми связями.

Резонатор удобно характеризовать величиной его нагруженной добротности:

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} = \frac{\psi_0}{2\Delta\psi}, \quad (10.7)$$

где f_0 — резонансная частота;
 Δf — полоса пропускания по уровню рабочего затухания 3 дБ.

На рис. 10.9, а, б дана зависимость Q от r , найденная графически из семейства кривых рис. 10.7.

Приближенное аналитическое выражение

$$Q \approx -\frac{\pi}{4r^2} \quad (10.8)$$

можно применять при $Q > 10$.

Величина r связана с переходным затуханием $C(\text{дБ})$ полосковых направленных ответвителей на входе и выходе резонатора

$$C(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{1+r^2}{r^2}, \quad (10.9)$$

где величина $C(\text{дБ})$ соответствует средней частоте ($\psi = \frac{\pi}{2}$) рабочей полосы ответвителя.

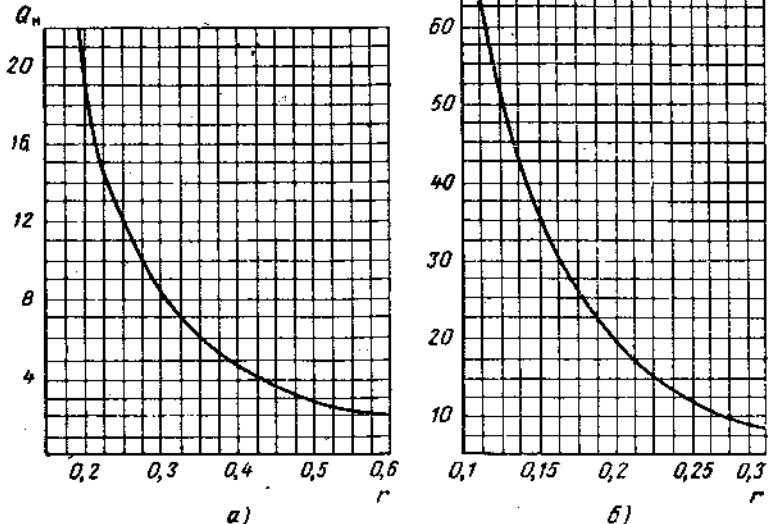


Рис. 10.9. Нагруженная добротность резонатора ППФ в зависимости от сопротивления связи:
а—для малых значений добротности; б—для больших значений добротности.

Связь между $C(\text{дБ})$ и геометрическими размерами полосковой линии приведена в таблицах и графиках гл. 5.

10.4. ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР С ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМИ СВЯЗЯМИ

Фильтр на связанных линиях с четвертьволновыми связями представляет собой цепочку резонаторов, описанных в предыдущем параграфе и соединенных отрезками полосковых линий длиной $\lambda_0/4$ (рис. 10.10). Фильтры с четвертьволновыми связями, независимо от конкретной конструкции резонатора, рассчитываются общими методами, описанными в гл. 8; основным этапом расчета является определение нагруженной добротности Q резонаторов по заданным параметрам частотной характеристики рабочего затухания (f_p , f_{-n} , f_3 , f_{-3} , b_3 , b_n). В случае фильтра с максимально плоской характеристикой величины Q находят по формуле (8.12). Для чебышевских фильтров по-прежнему используются таблицы гл. 8. После

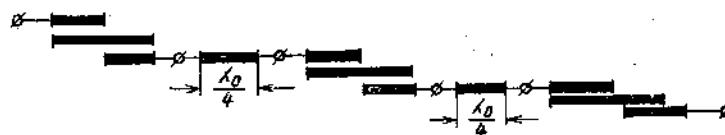


Рис. 10.10. Схема фильтра на связанных линиях с четвертьволновыми связями.

того, как требуемые величины Q найдены, определяют геометрические размеры резонаторов и связывающих линий по (10.8), (10.9) и таблицам гл. 5.

Пример. Задано: частотная характеристика ППФ — максимально плоская, связи четвертьволновые, полоса пропускания по уровню 0,5 дБ ($|G|_{\max}=0,33$) составляет 8%, полоса заграждения по уровню 40 дБ равна 25%. Волновое сопротивление входной и выходной линий равно 75 ом. Найти геометрические размеры элементов фильтра.

1. Определяем необходимое число контуров по формуле (8.8)

$$n = \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\lg \left(\frac{\tau_3}{\tau_n} \right)} = 4,79 \approx 5,$$

где L_3 и L_n — функции рабочего затухания, соответствующие b_3 и b_n ;

$$\tau_3 = \frac{f_3}{f_0} - \frac{f_0}{f_3} \approx \frac{2\Delta f_3}{f_0};$$

$$\tau_n = \frac{f_n}{f_0} - \frac{f_0}{f_n} \approx \frac{2\Delta f_n}{f_0}$$

— относительные расстройки, соответствующие граничным частотам полос заграждения и пропускания.

2. Нагруженные добротности контуров определяем по формуле (8.12)

$$Q_m = Q_\phi \sin \frac{2m-1}{2n} \pi,$$

где $Q_\phi = \frac{n\sqrt{h}}{\frac{f_u}{f_0} - \frac{f_0}{f_\pi}}$ — добротность фильтра по уровню рабочего затухания 3 дБ;

$$h = \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 + |\Gamma|_{\max}^2}},$$

откуда $Q_1 = Q_5 = 3,0; Q_2 = Q_4 = 7,8; Q_3 = 9,66.$

3. Учитываем влияние четвертьволновых линий связи; добротности крайних звеньев уменьшаем на $\pi/8$, а средних — на $\pi/4$ [см. (8.13)]:

$$Q_1^0 = Q_5^0 = 2,6,$$

$$Q_2^0 = Q_4^0 = 7,0,$$

$$Q_3^0 = 8,87.$$

4. По графику рис. 10.9, а определяем сопротивление связи всех резонаторов:

$$r_1 = r_5 = 0,515,$$

$$r_2 = r_4 = 0,327,$$

$$r_3 = 0,29.$$

5. Переходное затухание звеньев в «восьмиполосном режиме» находим по формуле (10.9):

$$C_i = 10 \lg \frac{1 + r_i^2}{r_i^2},$$

$$C_1 = C_5 = 6,78 \text{ дБ},$$

$$C_2 = C_4 = 10,15 \text{ дБ},$$

$$C_3 = 11,1 \text{ дБ}.$$

6. По графикам гл. 5 определяем геометрические размеры связанных полосковых линий при заданном отношении $t/b = 0,2$ (b — расстояние между основаниями, t — толщина внутренних проводников) и $p_0 = 75 \text{ ом}$:

$$\frac{w_1}{b} = \frac{w_5}{b} = 0,265; \quad \frac{s_1}{b} = \frac{s_5}{b} = 0,11;$$

$$\frac{w_2}{b} = \frac{w_4}{b} = 0,355; \quad \frac{s_2}{b} = \frac{s_4}{b} = 0,2;$$

$$\frac{w_3}{b} = 0,370; \quad \frac{s_3}{b} = 0,215,$$

Эскиз внутренних проводников фильтра для случая $b = 16 \text{ мм}$ дан на рис. 10.11. Волновое сопротивление соединительных линий $p_0 = 75 \text{ ом}$ обеспечивается полоской с шириной $w_0 = 7,5 \text{ мм}$ (см. рис. 5.7 гл. 5).

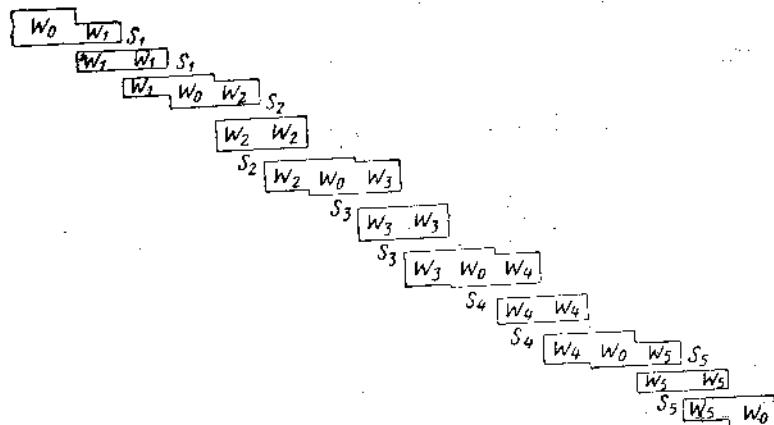


Рис. 10.11. Эскиз внутренних проводников пятизвенного ППФ фильтра с четвертьвольновыми связями.

10.5. РЕЗОНАТОР ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

Резонатор ПЗФ изображен на рис. 10.12. Связи считаются уравновешенными ($\tilde{r}_1 = \tilde{r}_5 = p_0^2$). Плечо 4 короткозамкнуто, а плечо 2 разомкнуто, либо наоборот; ψ — электрическая длина звена.

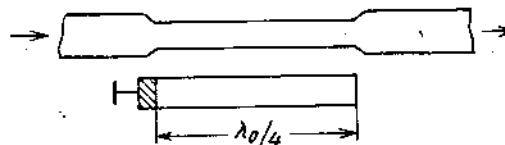


Рис. 10.12. Резонатор ПЗФ (внутренние проводники) на связанных линиях.

В ПЗФ звено обладает свойствами резонатора. Матрица резонатора (рис. 10.12) имеет вид

$$[T] = \frac{1}{2 \cos \psi} \begin{bmatrix} (2 \cos^2 \psi - r^2 \sin^2 \psi) + j2\rho \sin \psi \cos \psi & r^2 \sin^2 \psi \\ r^2 \sin^2 \psi & (2 \cos^2 \psi - r^2 \sin^2 \psi) - j2\rho \sin \psi \cos \psi \end{bmatrix}, \quad (10.10)$$

откуда рабочие затухание и φ резонатора равны

$$b = 10 \lg |T_{11}|^2 = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{r^4 \sin^4 \psi}{4 \cos^2 \psi} \right\}; \quad (10.11)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im} T_{11}}{\operatorname{Re} T_{11}} = \arctg \frac{2\rho \sin \psi \cos \psi}{2 \cos^2 \psi - r^2 \sin^2 \psi}. \quad (10.12)$$

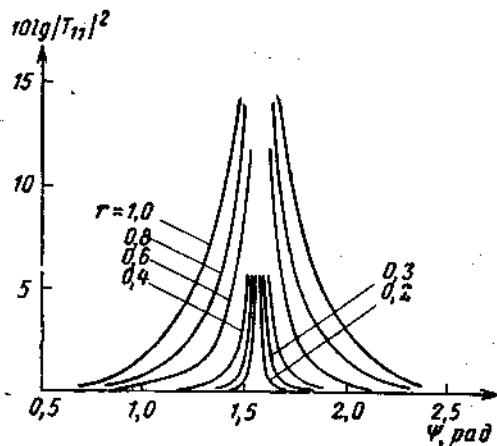


Рис. 10.13. Частотная характеристика рабочего затухания звена ПЗФ.

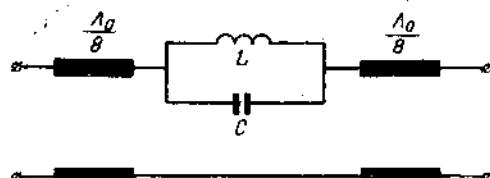


Рис. 10.14. Эквивалентная схема резонатора ПЗФ.

Зависимость $b(\psi)$ изображена на рис. 10.13. Аналогичные кривые имеет LC -контур, включенный согласно рис. 10.14. Таким образом, заграждающий контур на связанных линиях эквивалентен контуру LC , включенному между отрезками длинных линий длиной $l = \Lambda_0/8$, где Λ_0 соответствует резонансной частоте контура. Последнее обстоятельство позволяет конструировать ПЗФ с четвертьволновыми связями без включения специальных соединительных линий связи длиной $\Lambda_0/4$.

Нагруженная добротность резонатора ПЗФ может быть определена путем обработки резонансных кривых рис. 10.13; соответствующая зависимость изображена на рис. 10.15, а, б.

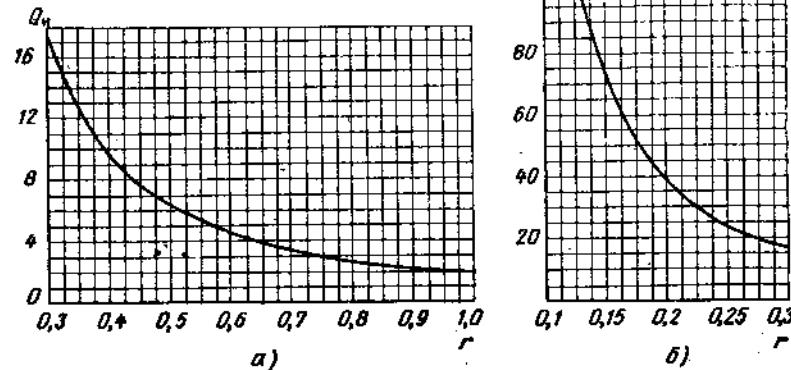


Рис. 10.15. Нагруженная добротность резонатора ПЗФ в зависимости от сопротивления связи:
а — для малых значений добротности; б — для больших значений добротности.

Приближенное аналитическое выражение для добротности

$$Q \approx \frac{\pi}{2r^2} \quad (10.13)$$

можно применять при $Q > 5$.

10.6. ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩИЙ ФИЛЬТР ИЗ ОДИНАКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Каскадное соединение одинаковых резонаторов (рис. 10.12) образует простейший ПЗФ. При небольшом числе резонаторов параметры такого фильтра приемлемы.

Рабочее затухание ПЗФ из одинаковых звеньев может быть получено путем возвведения в степень матрицы (10.10) [см. (1.9)]

$$b = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{r^4 \sin^4 \psi}{4 \cos^3 \psi} \left| U_{n-1} \left(\frac{2 \cos^2 \psi - r^2 \sin^2 \psi}{2 \cos \psi} \right) \right|^2 \right\}. \quad (10.14)$$

Характеристики трехзвенного фильтра, вычисленные по (10.14), показаны на рис. 10.16. Основные параметры ПЗФ из двух и трех одинаковых звеньев показаны на графиках, изображенных на

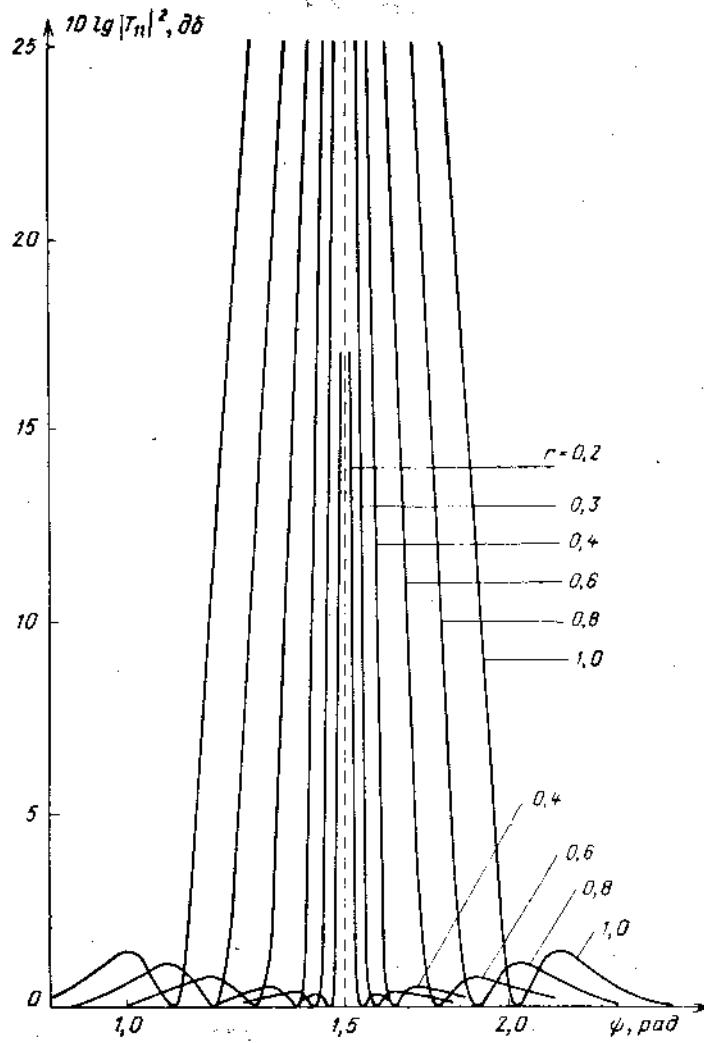


Рис. 10.16. Частотные характеристики рабочего затухания трехзвенного ПЗФ из одинаковых звеньев при различных связях.

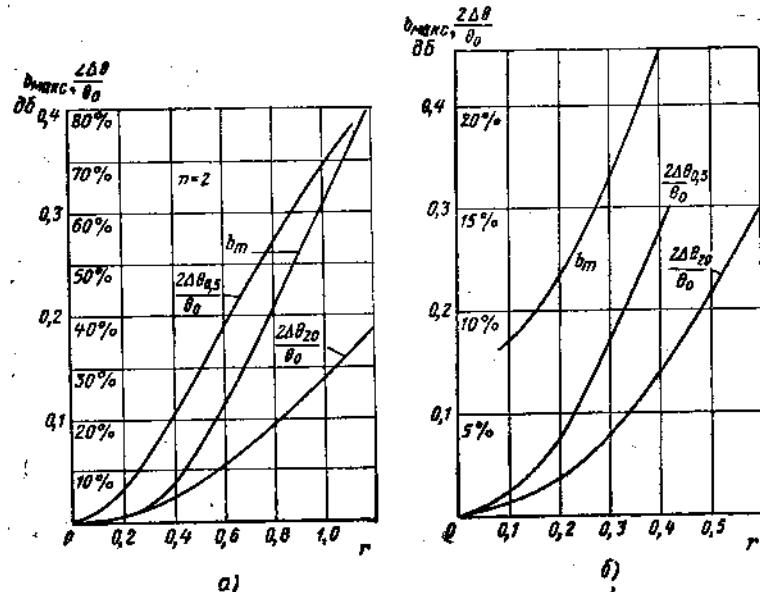


Рис. 10.17. Графики для определения основных параметров ПЗФ из одинаковых звеньев:
а — двухзвенный фильтр; б — трехзвенный фильтр.

рис. 10.17. Здесь b_{\max} — максимальное значение осцилляции характеристики затухания в полосе пропускания, $\frac{2\Delta\theta_{45}}{\theta_0}$ — полоса частот (в %) между точками $b_n = 0,5$ дБ, $\frac{2\Delta\theta_{20}}{\theta_0}$ — полоса заграждения (в %) по уровню $b_3 = 20$ дБ. При слабых связях осцилляции рабочего затухания в области пропускания невелики; при этом мала также и область заграждения. При увеличении связей расширяется полоса заграждения, но одновременно возрастают осцилляции вне этой полосы, так что характеристики практически становятся малопригодными.

10.7. ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩИЙ ФИЛЬТР С ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМИ СВЯЗЯМИ И ОПТИМАЛЬНЫМИ ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Резонатор ПЗФ на связанных линиях эквивалентен заграждающему LC -конттуру, включенному между отрезками длинных линий длиной $l = \frac{\lambda_0}{8}$ (см. рис. 10.14). Эти особенности резонатора позволяют конструировать ПЗФ с четвертьволновыми связями без включения между резонаторами четвертьволновых отрезков линий, как это делается для ППФ на связанных линиях. Расчет ПЗФ с четвертьволновыми связями производится по общей методике, описанной в гл. 8. Основной расчетной величиной является нагруженная добротность резонатора. В качестве прототипа принимается ППФ с четвертьволновыми связями; нагруженные добротности резонаторов такого фильтра приводятся в табл. 8.2 гл. 8. Там же дан порядок расчета ПЗФ при ППФ, принятом в качестве прототипа.

Пример. Задано: характеристика ПЗФ на связанных линиях — чебышевская, связи четвертьволновые, полоса частот, расположенная между крайними частотами полосы пропускания (рис. 8.14) $V_n = 22,4\%$ по уровню $b_{n\mu} = 0,5 \text{ дБ}$, полоса заграждения $V_s = 8,4\%$ по уровню $b_s = 20 \text{ дБ}$. Волновое сопротивление входных и выходных линий равно 50Ω .

Найти геометрические размеры фильтра.

1. Определяем необходимое число звеньев ПЗФ по формуле (8.7)

$$n = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\operatorname{ar ch} \frac{\eta_n}{\eta_3}} = 2,47 \approx 3,$$

где L_3 и L_n — функции рабочего затухания, соответствующие b_3 и b_n ($L_3 = 100$, $L_n = 1,12$):

$$\eta_3 = \frac{f_3}{f_0} - \frac{f_0}{f_3} \approx \frac{2\Delta f_3}{f_0} = 0,084; \quad \eta_n = \frac{f_n}{f_0} - \frac{f_0}{f_n} \approx \frac{2\Delta f_n}{f_0} = 0,224.$$

2. Нагруженные добротности (нормированные) звеньев прототипа определяем по табл. 8.2.

При $n = 3$, $b_n = 0,5 \text{ дБ}$ имеем $Q_1^I S = Q_3^I S = 0,8$; $Q_2^I S = 0,55$, откуда нагруженные добротности звеньев ПЗФ равны (см. гл. 8)

$$Q_1^{II} = \frac{1}{Q_1^I S^2} = Q_3^{II} = 5,57; \quad Q_2^{II} = \frac{1}{Q_2^I S^2} = 8,11.$$

3. По графикам рис. 10.15, а находим

$$r_1 = r_3 = 0,535; \quad r_2 = 0,437.$$

4. Переходное затухание направленных ответвителей, связывающих основную линию с резонаторами ПЗФ:

$$C_1 = C_3 = 10 \lg \frac{1 + r_1^2}{r_1^2} = 6,52 \text{ дБ},$$

$$C_2 = 10 \lg \frac{1 + r_2^2}{r_2^2} = 7,95 \text{ дБ}.$$

5. По табл. 5.10 определяем геометрические размеры связанных линий при $\rho_0 = 50 \Omega$ и $\frac{t}{b} = 0,2$:

$$\frac{w_1}{b} = \frac{w_3}{b} = 0,575; \quad \frac{s_1}{b} = \frac{s_3}{b} = 0,06;$$

$$\frac{w_2}{b} = 0,665; \quad \frac{s_2}{b} = 0,09.$$

Эскиз ПЗФ дан на рис. 10.18.

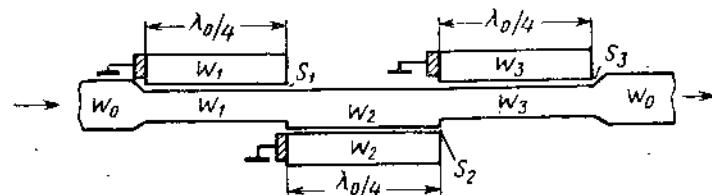


Рис. 10.18. Эскиз внутренних проводников трехзвенного ПЗФ.

10.8. ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМИ СВЯЗЯМИ

Непосредственное соединение звеньев, изображенных на рис. 10.1, образует фильтр с непосредственными связями (рис. 10.19).

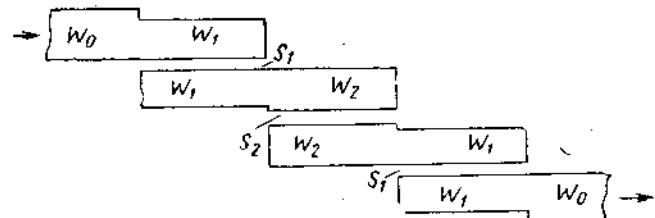


Рис. 10.19. ППФ с непосредственными связями (внутренние проводники).

При небольшом числе звеньев точную теорию таких фильтров можно построить путем перемножения матриц типа (10.1) и последующего численного анализа результатов с помощью ЭЦВМ [3,8].

При большом числе звеньев применяется приближенный расчет с помощью сравнения фильтра и прототипа.

Если в качестве прототипа используется ступенчатый переход (см. гл. 9), то указанное сравнение производится позвено в соответствии с рис. 10.20. Условием идентичности звена фильтра и прототипа считается равенство элементов T_{11} матрицы $[T]$ на средней частоте полосы пропускания [3].

Эта процедура приводит к следующим расчетным формулам:

$$C_i(\partial\delta) = 10 \lg(1 + q_i); \quad (10.15)$$

$$\Phi_i = \Phi_{i+1} = 2\psi - \frac{\pi}{2}. \quad (10.16)$$

где $C_i(\partial\delta)$ — переходное затухание направленного ответвителя, образующего i -е звено (рис. 10.20);

q_i — перепад волновых сопротивлений (КСВ) i -й ступеньки прототипа;

Φ — частотная переменная в выражении для рабочего затухания фильтра, имеющая смысл фазы коэффициента передачи звена. Принимается, что Φ для всех звеньев одинаковы;

$$\psi = \frac{2\pi l}{\lambda};$$

l — длина звена (рис. 10.20).

Приближенно частотная характеристика фильтра описывается выражениями

$$\left. \begin{aligned} b &= 10 \lg \left[1 + h^2 T_n^2 \left(\frac{\sin 2\psi}{S} \right)^2 \right] \\ \text{либо} \\ b &= 10 \lg \left[1 + h^2 \left(\frac{\sin 2\psi}{S} \right)^{2n} \right] \end{aligned} \right\} \quad (10.17)$$

соответственно случаям чебышевской и максимально плоской характеристики.

Примерный вид характеристики, соответствующей приближенным соотношениям (10.17), показан на рис. 10.21 пунктиром. Здесь же, сплошной линией, дан вид точной частотной характеристики фильтра на связанных линиях. Хорошее совпадение точной и приближенной характеристик имеет место в полосе пропускания и вблизи нее (в полосе частот равной приблизительно удвоенной полосе пропускания). Указанное хорошее совпадение при данной методике расчета обычно гарантируется для фильтров с полосой пропускания, меньшей 30%. За пределами этой области погрешность расчета проявляется в увеличении рабочего затухания по сравнению с заданным (рис. 10.21).

Из (10.17) видно, что характеристика рабочего затухания фильтра представляет собой полином по $\sin^2 2\psi$ (2ψ — электрическая длина резонатора), в то время, как соответствующая характеристика

прототипа — ступенчатого перехода является полиномом по $\cos^{2\theta}$ (θ — электрическая длина ступеньки). Таким образом характеристика фильтра сдвинута на $\pi/2$ относительно характеристики прототипа.

При одинаковой абсолютной величине полосы пропускания фильтра и прототипа относительные полосы будут отличаться в два раза

$$W_n = 2V_n, \quad (10.18)$$

поскольку в ступенчатом переходе относительная полоса образуется делением абсолютной полосы на $\pi/2$, а в фильтре — делением той же абсолютной полосы на π . Это необходимо учитывать при расчёте.

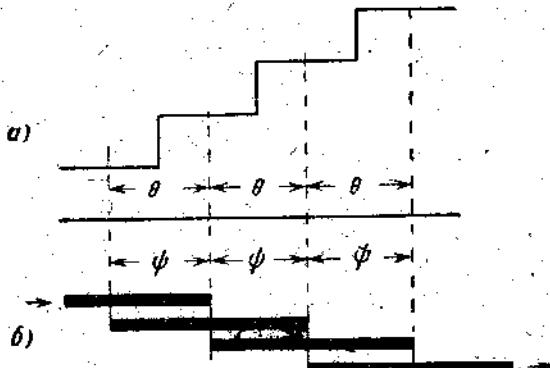


Рис. 10.20. Позвенное сравнение прототипного ступенчатого перехода и фильтра:
а — ступенчатый переход; б — фильтр.

так, выбирая заранее относительную полосу пропускания прототипа — ступенчатого перехода (W_n) — вдвое большей требуемой относительной полосы фильтра (V_n).

Из рис. 10.21 видно, что паразитные полосы пропускания фильтров на связанных линиях с непосредственно соединенными звенями расположены на частотах, соответствующих $2\psi = 3\pi, 5\pi, \dots, 2(l+1)\pi$, т. е. первая паразитная полоса пропускания расположена на частоте, втрое большей ($3f_0$), чем частота рабочей полосы пропускания f_0 . Это обуславливает одно из преимуществ фильтров данного типа перед другими типами фильтров, у которых первая паразитная полоса пропускания расположена на частоте, вдвое большей ($2f_0$), чем частота рабочей полосы.

Число резонаторов n фильтра на связанных линиях соответствует числу ступенек прототипа (ступенчатого перехода). Расчет n производится по формулам (9.3) и (9.4) гл. 9 с учетом соотношения (10.18).

При мер. Задано: частотная характеристика ППФ с непосредственно связанными звенями — максимально плоская, полоса пропускания (V_n) по уровню $|G|_{\max} = 0,3$ ($b_n = 0,41 \text{ дБ}$) составляет 7%.

полоса заграждения (V_3) по уровню $b_3 = 40 \text{ дБ}$ равна 14%. Волновое сопротивление входной и выходной линий равно 75 ом.

Найти геометрические размеры элементов фильтра.

1. Определяем необходимое число резонаторов прототипа по формуле (9.3) и (10.18):

$$n = \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\sin \frac{\pi}{4} W_3} = \frac{\lg \sqrt{\frac{10000 - 1}{1098 - 1}}}{\sin \frac{\pi}{4} \cdot 0,28} = 8,4,$$

$$\lg \frac{\sin \frac{\pi}{4} W_n}{\sin \frac{\pi}{4} W_p} = \lg \frac{\sin \frac{\pi}{4} \cdot 0,14}{\sin \frac{\pi}{4} \cdot 0,28}$$

где L_3 и L_n — функции рабочего затухания, соответствующие рабочему затуханию b_3 и b_n .

Принимаем $n = 9$.

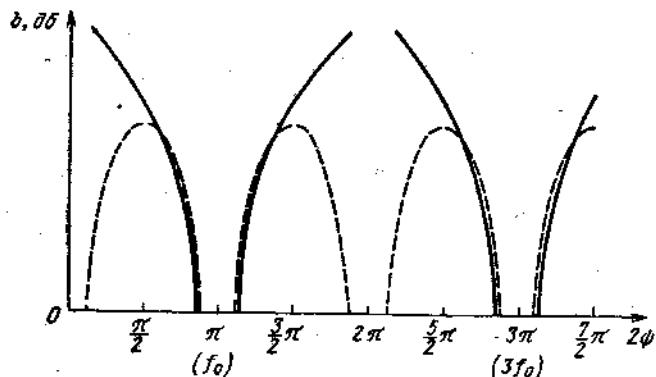


Рис. 10.21. Частотная характеристика рабочего затухания фильтра на связанных линиях (сплошные линии) и ступенчатого перехода (пунктирные линии).

2. По табл. 9.4 для $n = 9$, $W_n = 0,14$ и $|\Gamma|_{\max} = 0,3$ находим перепады волновых сопротивлений ступенек q_i ступенчатого перехода с максимально плоской характеристикой:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{10} = 2,899, \\ q_2 &= q_9 = 22,638, \\ q_3 &= q_8 = 90,909, \\ q_4 &= q_7 = 136,98, \\ q_5 &= q_6 = 208,33. \end{aligned}$$

3. Величины переходных затуханий направленных ответвлений звеньев (в восьмиполосном режиме) определяются по формуле:

$$\begin{aligned} C_t(\text{дБ}) &= 10 \lg (1 + q_t), \\ C_1 &= C_{10} = 5,91 \text{ дБ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= C_9 = 13,74 \text{ дБ}, \\ C_3 &= C_8 = 19,63 \text{ дБ}, \\ C_4 &= C_7 = 21,40 \text{ дБ}, \\ C_5 &= C_6 = 23,21 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

4. По табл. 5.11 определяем размеры внутренних проводников полосковых линий при условии, что $\rho_0 = 75 \text{ ом}$; $t = 3 \text{ мм}$; $b = 16 \text{ мм}$ ($t/b = 0,19$).

Ширина полосковых линий отдельных звеньев:

$$\begin{aligned} w_1 &= w_{10} = 3,7 \text{ мм}, \\ w_2 &= w_9 = 6,41 \text{ мм}, \\ w_3 &= w_8 = 7,10 \text{ мм}, \\ w_4 &= w_7 = 7,20 \text{ мм}, \\ w_5 &= w_6 = 7,26 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Расстояния между полосковыми линиями:

$$\begin{aligned} s_1 &= s_{10} = 1,70 \text{ мм}, \\ s_2 &= s_9 = 4,74 \text{ мм}, \\ s_3 &= s_8 = 7,52 \text{ мм}, \\ s_4 &= s_7 = 8,35 \text{ мм}, \\ s_5 &= s_6 = 9,23 \text{ мм}. \end{aligned}$$

10.9. РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРОТОТИПНЫХ СХЕМ

Расчет полосно-пропускающих фильтров проводится на основе теории связанных линий, используемой в сочетании с модифицированными прототипными схемами. При этом в классические прототипные схемы фильтров нижних частот (рис. 9.12, 9.13) вводятся идеальные преобразователи полной проводимости [7].

Коэффициенты идеальных преобразователей полных проводимостей J связаны с параметрами элементов прототипных схем соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{J_{0,1}}{g_0} &= \frac{1}{V g_0 g_1 \omega_1}, \\ \frac{J_{k, k+1}}{g_0} &= \frac{1}{V g_k g_{k+1} \omega_1} \quad \text{от } k=1 \text{ до } k=n-1, \\ \frac{J_{n, n+1}}{g_0} &= \frac{1}{V g_n g_{n+1} \omega_1}. \end{aligned} \right\} \quad (10.19)$$

Параметры $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ фильтров с чебышевской или максимально плоской частотной характеристикой определяются из табл. 9.5 и 9.6.

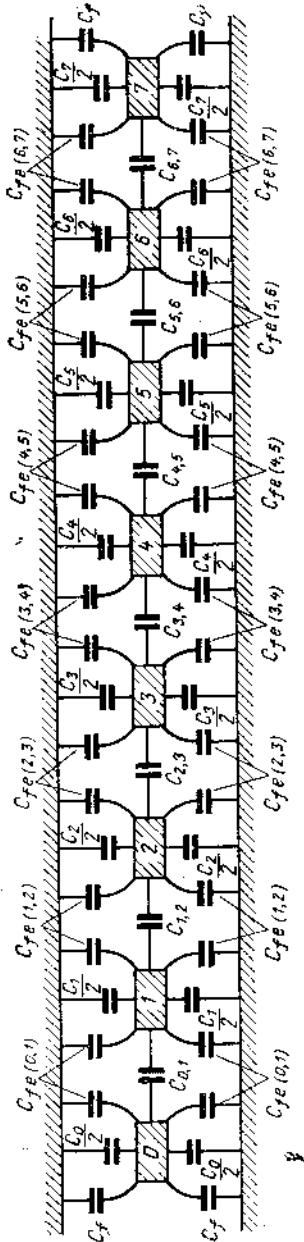


Рис. 10.22. Собственные и взаимные емкости штырей фильтра.

В схемах фильтров с максимально плоской и чебышевской частотной характеристиками и с нечетным числом n резонаторов

$$g_0 = g_{n+1} = 1.$$

При чебышевской частотной характеристики и четном числе резонаторов

$$g_0 = 1; \quad g_{n+1} = \frac{1}{r}, \quad (10.20)$$

где r определяется согласно (9.24) или по табл. 9.5.

В выражениях (10.19) нормированная граничная частота ω_1' выбирается равной $\omega_1 = 1$; проводимость нагрузок на входе и выходе фильтра

$$\sigma_0 = \frac{1}{\rho_0}. \quad (10.21)$$

Собственные емкости штырей фильтра на встречных штырях с полосами пропускания менее 30% (рис. 10.22 и 10.24, а) рассчитываются по формулам [4.5] (рассматривается вариант с замкнутыми оконечными штырями):

$$\frac{C_1}{\varepsilon} = \frac{376,7}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left\{ \sigma_0 - M_1 + H \sigma_0 \left[\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{2} + \left(\frac{J_{0,1}}{\sigma_0} \right)^2 + N_{1,2} - \frac{J_{1,2}}{\sigma_0} \right] \right\}; \quad (10.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_n}{\varepsilon} = & \frac{376,7}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left\{ \sigma_0 - M_n + H \sigma_0 \left[\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{J_{n,n+1}}{\sigma_0} \right)^2 + N_{n-1,n} - \frac{J_{n-1,n}}{\sigma_0} \right] \right\}; \end{aligned} \quad (10.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_k}{\varepsilon} \Big|_{\substack{\text{от } k=2 \\ \text{до } k=n-1}} = & \frac{376,7}{\sqrt{\varepsilon_r}} H \sigma_0 \left(N_{k-1,k} + N_{k,k+1} - \frac{J_{k-1,k}}{\sigma_0} - \right. \\ & \left. - \frac{J_{k,k+1}}{\sigma_0} \right); \end{aligned} \quad (10.24)$$

$$\frac{C_0}{\varepsilon} = \frac{376,7}{\sqrt{\varepsilon_r}} (2\sigma_0 - M_1); \quad \frac{C_{n+1}}{\varepsilon} = \frac{376,7}{\sqrt{\varepsilon_r}} (2\sigma_0 - M_n), \quad (10.25)$$

где

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} \frac{f_n}{f_0} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\tau_n}{2} \right); \quad (10.26)$$

$$f_0 = \frac{f_n + f_{-n}}{2}; \quad \tau_n = \frac{f_n - f_{-n}}{f_0}; \quad (10.27)$$

f_n, f_{-n} — граничные частоты полосы пропускания;

f_0 — средняя частота (рис. 10.23);

ε_r — относительная диэлектрическая постоянная;

H — коэффициент пропорциональности.

Вспомогательные коэффициенты соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} N_{k, k+1} &= \sqrt{\left(\frac{J_{k, k+1}}{\sigma_0}\right)^2 + \frac{\lg^2 \theta_1}{4}}, \\ M_1 &= \sigma_0 \left[\frac{J_{0,1}}{\sigma_0} \sqrt{H} + 1 \right], \\ M_n &= \sigma_0 \left[\frac{J_{n, n+1}}{\sigma_0} \sqrt{H} + 1 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (10.28)$$

Взаимные емкости штырей фильтра (рис. 10.22) определяются согласно следующим выражениям:

$$\frac{C_{0,1}}{\epsilon} = \frac{376,7}{\sqrt{\epsilon_r}} (M_1 - \sigma_0); \quad (10.29)$$

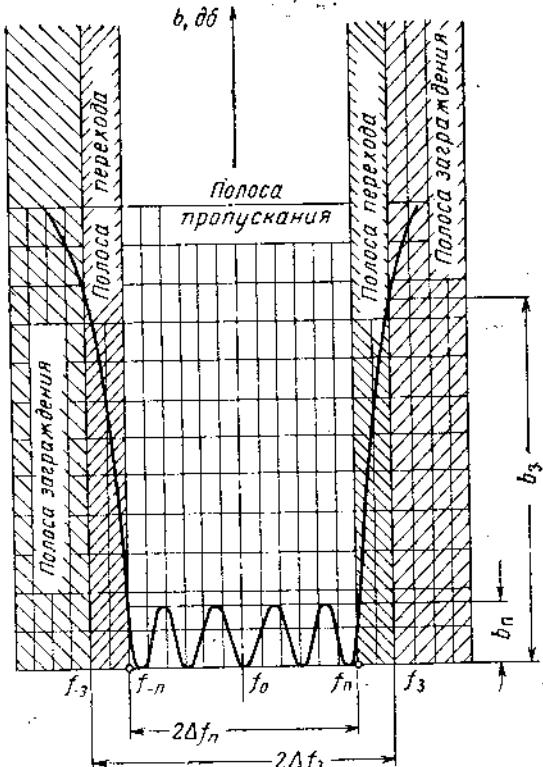


Рис. 10.23. Частотная характеристика рабочего затухания ППФ.

$$\frac{C_{n, n+1}}{\epsilon_a} = \frac{376,7}{\sqrt{\epsilon_r}} (M_n - \sigma_0); \quad (10.30)$$

$$\left. \frac{C_{k, k+1}}{\epsilon_a} \right|_{\text{от } k=1 \text{ до } k=n-1} = \frac{376,7 H \sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{J_{k, k+1}}{\sigma_0} \right). \quad (10.31)$$

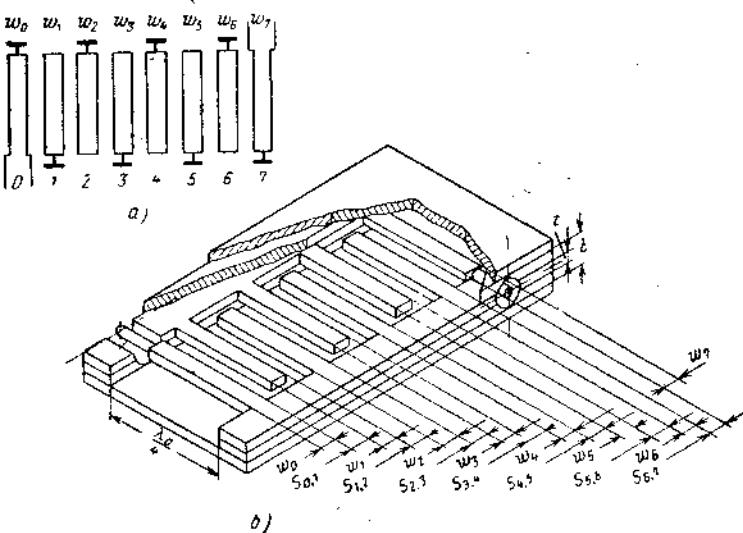


Рис. 10.24. Фильтр с непосредственными связями на встречных штырях:

а—схема фильтра; *б*—эскиз фильтра.

Ширина внутренних штырей (рис. 10.24) вычисляется с помощью выражения:

$$\frac{w_k}{b} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{b} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_k}{\epsilon_a} \right) - \frac{(C_{fe})_{k-1, k}}{\epsilon_a} - \frac{(C_{fe})_{k, k+1}}{\epsilon_a} \right]. \quad (10.32)$$

При одинаковой ширине крайних штырей

$$\frac{w_0}{b} = \frac{w_{n+1}}{b} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{b} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_0}{\epsilon_a} \right) - \frac{C_f}{\epsilon_a} - \frac{(C_{fe})_{0,1}}{\epsilon_a} \right], \quad (10.33)$$

где *t* и *b* — размеры полосковой линии.

Емкости $\frac{(C_{fe})_{k, k+1}}{\epsilon_a}$; $\frac{C_f}{\epsilon_a}$ определяются по графикам гл. 5 (рис. 5.6, 5.26).

Если окажется, что ширина штырей находится в пределах

$$0.1 \left(1 - \frac{t}{b}\right) < \frac{w_k}{b} < 0.35 \left(1 - \frac{t}{b}\right), \quad (10.34)$$

то производится коррекция с помощью формулы

$$\frac{w'_k}{b} = \frac{0.07 \left(1 - \frac{t}{b}\right) + \frac{w_k}{b}}{1.2}, \quad (10.35)$$

где w'_k — скорректированная ширина штырей.

Пример. Задано: частотная характеристика чебышевского полосно-пропускающего фильтра. В полосе пропускания ($f_n = 1575 \text{ MГц}$, $f_{-n} = 1425 \text{ MГц}$) максимальное вносимое затухание $b_n = 0.1 \text{ дБ}$.

На границах полосы заграждения

$$f_3 = 1700 \text{ MГц}; \quad f_{-3} = 1380 \text{ MГц};$$

минимально допустимое вносимое затухание $b_3 = 50 \text{ дБ}$. Волновое сопротивление входной и выходной линий равно $\rho_0 = 50 \text{ ом}$. Определить геометрические размеры элементов фильтра.

1. Число контуров фильтра [см. (8.7)]

$$n = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{L_3 - l}{L_n - 1}}}{\operatorname{ar ch} \left(\frac{\tau_3}{\tau_n}\right)} = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{10^5 - 1}{1.023 - 1}}}{\operatorname{ar ch} \left(\frac{0.257}{0.098}\right)} = 5.239,$$

где L_n и L_3 — функции рабочего затухания, соответствующие b_n и b_3 :

$$L_n = \operatorname{ant lg} \left(\frac{b_n}{10} \right) = \operatorname{ant lg} \frac{0.1}{10} = 1.023;$$

$$L_3 = \operatorname{ant lg} \left(\frac{b_3}{10} \right) = \operatorname{ant lg} \frac{50}{10} = 10^5;$$

τ_n , τ_3 — относительные расстройки, соответствующие граничным частотам полос пропускания и заграждения:

$$\tau_n = \frac{f_n}{f_0} - \frac{f_0}{f_n} = \frac{1575}{1500} - \frac{1500}{1575} = 0.098;$$

$$\tau_3 = \frac{f_3}{f_0} - \frac{f_0}{f_3} = \frac{1700}{1500} - \frac{1500}{1700} = 0.257.$$

Округляя значения n до ближайшего целого числа, выбираем

$$n = 6.$$

2. Согласно табл. 9.5 для известных n и b_n находим

$$g_1 = 1.1681, \quad g_4 = 1.5171,$$

$$\begin{aligned} g_2 &= 1.4040; \quad g_5 = 1.9029; \\ g_3 &= 2.0562; \quad g_6 = 0.8618; \end{aligned}$$

соответственно из (10.20)

$$g_0 = 1; \quad g_7 = \frac{1}{r} = \frac{1}{0.7378} = 1.3554.$$

3. Вычисляем из (10.26) и (10.27)

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{f_n - f_{-n}}{2f_0}\right) = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{1575 - 1425}{2 \cdot 1500}\right) = 1.492.$$

4. Пользуясь (10.19), определяем коэффициенты идеальных преобразователей полных проводимостей. Результаты вычислений сведены в табл. 10.1.

5. Согласно (10.28) вычисляем вспомогательные коэффициенты $N_{k,k+1}$.

6. Задаемся масштабным множителем:

$$H = 0.05.$$

Правильность выбора этого коэффициента определяется ниже. Поскольку [см. (10.21)]

$$s_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{50} = 0.02,$$

то $M_1 = M_6 = 0.0242$.

7. С помощью (10.22) — (10.25) вычисляем собственные емкости на единицу длины линии, отнесенные к диэлектрической постоянной. Результаты вычислений см. в табл. 10.1.

8. Взаимные емкости между штырями (рис. 10.22) на единицу длины линии, отнесенные к диэлектрической постоянной, вычисляются согласно (10.29) — (10.31). Численные значения см. в табл. 10.1.

Проверка правильности выбора H сводится к подтверждению существования равенства [5]:

$$\frac{2C_{2,3}}{\epsilon_a} + \frac{C_3}{\epsilon_a} + \frac{2C_{3,4}}{\epsilon_a} \approx 5.4,$$

а потому можно считать, что коэффициентом H задавались правильно.

9. Выбираем полосковую линию с размерами (рис. 10.24)

$$t = 4.75 \text{ мм}; \quad b = 15.7 \text{ мм}.$$

По графикам рис. 5.25 находим численные значения расстояний между штырями $S_{k,k+1}$ (см. табл. 10.1), соответствующие емкостям $C_{k,k+1}/\epsilon_a$.

10. Ширину штырей w_k (рис. 10.24) рассчитываем по формулам (10.32) и (10.33). Необходимые значения емкостей

$$(C_{fe})_{k,k+1}/\epsilon_a; \quad C_f/\epsilon_a;$$

определяются из графиков рис. 5.26 и 5.6.

Таблица 10.1

Параметры и геометрические размеры четырех полоскового фильтра (к примеру на стр. 576)

k	$\frac{J_{k, k+1}}{\sigma_0}$	$N_{k, k+1}$	$\frac{C_{k, k+1}}{\epsilon_a}$	$\frac{C_k}{\epsilon_a}$	$S_{k, k+1}$	ω_k	$\frac{(C_{f/k, k+1})^2}{\epsilon_a}$	$\frac{C_f}{\epsilon_a}$
0	0,9252	—	1,5820	5,9519	4,04	10,20	0,32	0,8
1	0,7809	6,3965	0,3020	3,3903	10,64	3,94	0,66	—
2	0,5886	6,3759	0,2281	4,4186	13,00	4,78	0,70	—
3	0,5662	6,3738	0,2194	4,4930	13,21	4,80	0,71	—
4	0,5886	6,3759	0,2281	4,4930	13,00	4,80	0,70	—
5	0,7809	6,3965	0,3020	4,4186	10,64	4,78	0,66	—
6	0,9252	—	1,5820	3,3903	4,04	3,94	0,32	—
7	—	—	—	5,9519	—	10,20	—	0,8

Проверка численных значений (см. табл. 10.1) показывает, что соблюдается неравенство (10.34), иначе вводилась бы коррекция согласно (10.35).

ЛИТЕРАТУРА

- Полосковые системы сверхвысоких частот. Сб. статей под ред. В. И. Сушкиевича. Изд-во иностранной литературы, 1959.
- Уолп L. The Quarter-Wave Transformers. Prototype Circuit. Trans. IRE, 1960, Sept., v. MTT-8.
- Прокорова Н. И., Фельдштейн А. Л. Общий метод расчета фильтров с непосредственными связями. «Радиотехника», 1967, № 6.
- Маттей Дж. Л. Новый метод расчета полосовых фильтров СВЧ и его связь с другими методами. «Зарубежная радиоэлектроника», 1961, № 9.
- Маттей Дж. Л. Полосовые фильтры со встречными стержнями. «Зарубежная радиоэлектроника», 1963, № 7.
- Пистолькорс А. А. Антенны. Связьиздат, 1947.
- Cohn, S. B. Parallel-Coupled Transmission-Line-Resonator Filters. Trans. IRE, 1958, MTT-6, p. 223.
- Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восемиполюсников на СВЧ. Изд-во «Связь», 1965.

Λ_{10} , Λ_{20} — длины волн колебаний H_{10} и H_{20} в области щели;

$$\Lambda_{10} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{4a}\right)^2}}; \quad \Lambda_{20} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (11.3)$$

Условие деления мощности пополам:

$$\theta = \theta_0 = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, \quad (n = 1, 2, 3\dots), \quad (11.4)$$

откуда необходимая длина щели составляет

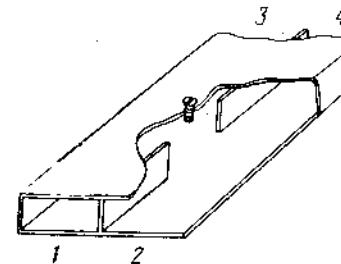


Рис. 11.1. Волноводный щелевой мост.

$$l = \frac{\theta_0}{2\pi} \frac{\Lambda_{20} \Lambda_{10}}{\Lambda_{20} - \Lambda_{10}}. \quad (11.5)$$

Рабочая полоса моста для идеализированной согласованной системы

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{2\Delta\theta}{\theta_0} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{4a}\right)^2\right]}, \quad (11.6)$$

где $\frac{2\Delta\theta}{\theta_0}$ определяется из (11.1) при заданном уровне затухания.

В табл. 11.1 даны расчетные значения полосы $\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0}$ для различных типов волноводов, подсчитанные по формуле (11.6).

В той же таблице даны значения $\frac{2\Delta\theta}{\theta_0}$ («система без дисперсии»).

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

МОСТЫ, НАПРАВЛЕННЫЕ ФИЛЬТРЫ И ОТВЕТВИТЕЛИ, МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

11.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Восьмиполосная система, служащая для направленного ответвления СВЧ энергии, называется направленным ответвителем. Определения трех типов направленности см. в гл. 2.

Мостом называется направленный ответвитель, в котором напряжения в выходных плечах равны по величине и при изменении частоты имеют постоянный фазовый сдвиг.

Весьма распространен сдвиг $\pi/2$, свойственный симметричным системам. Анализ таких систем проводится методом синфазного и противофазного возбуждения [1].

11.2. ВОЛНОВОДНЫЕ ЩЕЛЕВЫЕ МОСТЫ

Волноводным щелевым мостом [2] называется устройство, состоящее из двух прямоугольных волноводов, связанных щелью в общей узкой стенке (рис. 11.1).

В согласованном мосте напряжения в плечах 3 и 4 равны по величине и сдвинуты по фазе на $\pi/2$, а в плечо 2 мощность не поступает. Таким образом, система имеет направленность 1-го рода. Частотная зависимость переходного затухания согласованного моста определяется выражением

$$C_{14} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2} = 10 \lg \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}}, \quad (11.1)$$

где

$$\theta = \frac{2\pi l}{\Lambda_{10}} - \frac{2\pi l}{\Lambda_{20}}; \quad (11.2)$$

Таблица 11.1

Расчетные значения полосы пропускания для различных типов волноводов

Размеры волновода и длина волны, мм	Полоса, % по уровню		Размеры волновода и длина волны, мм	Полоса, % по уровню	
	(3±0,2) дб	(3±0,5) дб		(3±0,2) дб	(3±0,5) дб
10×23 $\lambda_0 = 34$	4	9,2	45×90 $\lambda_0 = 100$	5,1	11,6
34×72 $\lambda_0 = 100$	4,3	9,8	Система без дисперсии $\left(\frac{2\Delta\theta}{\theta_0}\right)$	6,4	14,6

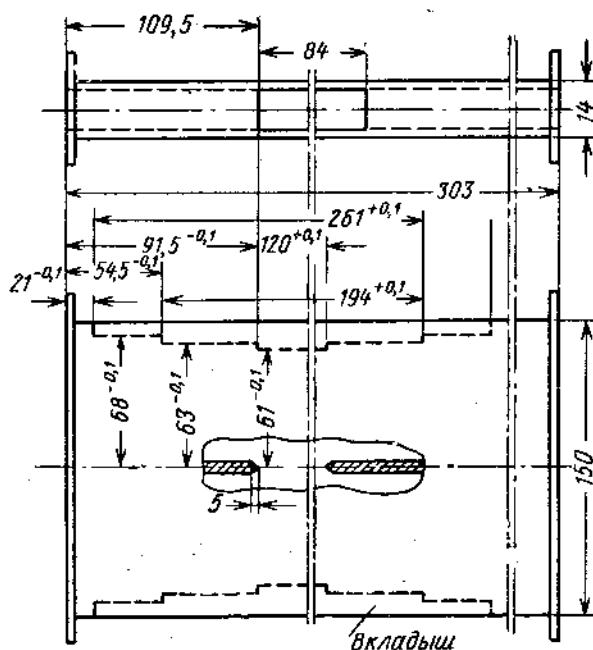


Рис. 11.2. Эскиз щелевого моста с емкостным согласованием.

Для согласования моста применяется емкостный штырь, расположенный в центре щели (рис. 11.1); при этом необходима некоторая экспериментальная корректировка длины щели.

Примерное устройство щелевого моста с емкостным согласованием показано на рис. 11.2. Сужение волновода в области щели имеет целью подавление волны H_{30} .

При емкостном согласовании полоса равного деления мощности обычно расширяется. Эксперимент показывает, что в этом случае можно достигнуть полосы 15—20% по уровню $(3\pm 0,5)$ дб. Направленность при этом ≥ 20 дб.

11.3. ВОЛНОВОДНЫЙ МОСТ СО МНОГИМИ ОТВЕРСТИЯМИ СВЯЗИ В УЗКОЙ СТЕНКЕ

Волноводный мост со многими отверстиями связи («многодырочный мост») состоит из двух прямоугольных волноводов, связанных множеством отверстий в общей узкой стенке (рис. 11.3). Напряжения делятся между плачами 3 и 4 со сдвигом $\pi/2$.

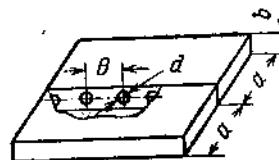


Рис. 11.3. Волноводный мост со многими отверстиями связи.

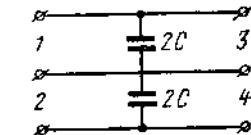


Рис. 11.4. Эквивалентная схема одного отверстия связи.

Частотная характеристика переходного затухания определяется из соотношения

$$C_{14} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2}. \quad (11.7)$$

$$|S_{14}|^2 = \sin^2 k \frac{\theta - \arccos (\cos \theta - Y \sin \theta)}{2}, \quad (11.8)$$

где

$$\theta = \frac{2\pi l}{\Lambda}; \quad (11.9)$$

k — число отверстий;

l — расстояние между центрами отверстий;

обычно $l = \frac{\Lambda_0}{4}$ и, следовательно, $\theta = \frac{\pi}{2} \frac{\Lambda_0}{\Lambda}$; $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$.

Величина Y представляет собой нормированную проводимость емкости в эквивалентной схеме одного отверстия связи (рис. 11.4).

При равном делении мощности

$$Y = \frac{\pi}{20} \sin \frac{\pi}{2k}. \quad (11.10)$$

Число отверстий k выбирается из конструктивных соображений. Затем определяются Y на средней длине волны:

$$Y_0 = \sin \frac{\pi}{2k}. \quad (11.11)$$

и диаметр отверстия из соотношения [3]

$$Y_0 = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{\Delta\theta}{b} \left(\frac{d}{a} \right)^3, \quad (11.12)$$

где a, b — размеры широкой и узкой стенок волновода;
 d — диаметр отверстия связи.

Рабочая полоса моста составляет

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 2 \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2 \right\}. \quad (11.13)$$

В табл. 11.2 даны значения полосы для различных типов волноводов и различного числа отверстий. Диаметры отверстий определяются по формулам (11.11) и (11.12).

Таблица 11.2
Расчетные значения полосы пропускания для различных типов волноводов с различным числом отверстий

Размеры волновода и длина волны, мм	Число отверстий, k	Полоса, % по уровню	
		$(3 \pm 0,2) \text{ dB}$	$(3 \pm 0,5) \text{ dB}$
10×23 $\lambda_0 = 34$	10	2,8	7,3
	50	2,3	6,2
34×72 $\lambda_0 = 100$	10	3,3	8,5
	50	2,6	7,2
45×90 $\lambda_0 = 100$	10	4,4	11,4
	50	3,5	9,7
Система без дисперсии $\left(\frac{2\Delta\theta}{\theta_0} \right)$	10	6,4	16,5
	50	5,1	14,0

11.4. МНОГОШЛЕЙФОВЫЙ КВАДРАТНЫЙ МОСТ

Многошлейфовый квадратный мост представляет собой систему, состоящую из двух передающих линий, связанных с помощью ответвлений (шлейфов) последовательно (в случае волноводов) или параллельно (в случае коаксиальных и полосковых линий). Схематическое изображение одного звена дано на рис. 11.5, а и б. Расстояние между шлейфами и длина их равны $\frac{\Delta\theta}{4}$.

Напряжение делится поровну между плечами 3 и 4 с фазовым сдвигом $\pi/2$.

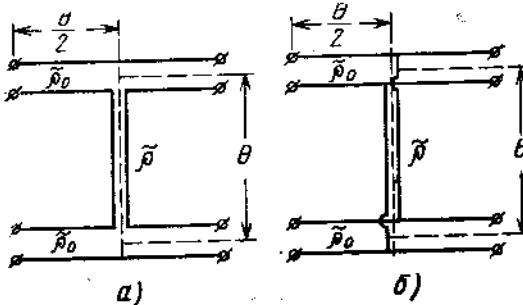


Рис. 11.5. Ответвления в звене квадратного моста:
а—последовательное; б—параллельное.

а) **Многошлейфовый квадратный мост со шлейфами разных волновых сопротивлений.** Частотная зависимость переходного затухания имеет вид

$$C_{14} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2}, \quad (11.14)$$

где

$$|S_{14}|^2 = \sin^2 \frac{k}{2} \left\{ \arccos \left(\cos \theta + 2 \sin \frac{\pi}{4k} \cdot \cos^2 \theta / 2 \right) - \right. \\ \left. - \arccos \left(\cos \theta - 2 \sin \frac{\pi}{4k} \cdot \sin^2 \theta / 2 \right) \right\}; \quad (11.15)$$

$$\theta = \frac{2\pi l}{\Lambda};$$

k — число шлейфов;

l — длина шлейфов.

Рабочая полоса частот определяется из следующих соотношений:

для коаксиальной системы

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2\Delta\theta}{\theta_0}; \quad (11.16)$$

для волноводной системы

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{2\Delta\theta}{\theta_0} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2 \right]. \quad (11.17)$$

Параметры мостов в зависимости от числа шлейфов даны в табл. 11.3.

Из таблицы видно, что при увеличении числа звеньев более $k = 20$ полоса расширяется незначительно.

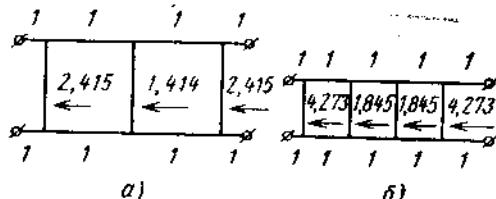


Рис. 11.6. Эскиз шлейфового моста с различными шлейфами:
а—трехшлейфового; б—четырехшлейфового.

Величина нормированного волнового сопротивления шлейфов, необходимая для равного деления мощности, определяется из следующих выражений:

при последовательном включении шлейфов

$$\rho = 2 \sin \frac{\pi}{4k}; \quad (11.18)$$

при параллельном включении шлейфов

$$\rho = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi}{4k}}. \quad (11.19)$$

б) *Многошлейфовый квадратный мост со шлейфами разных волновых сопротивлений.* Для улучшения направленности и согласования в [1] волновые сопротивления шлейфов было предложено делать неодинаковыми. Последние можно найти из условия идеальной направленности на средней длине волны.

Применение этого способа позволяет повысить уровень направленности и согласования. Мост из неодинаковых шлейфов целесообразно применять при числе звеньев $k < 5$, когда направленность моста из одинаковых звеньев часто недостаточна (направленность $> 15 \text{ dB}$, см. табл. 11.3). Если требуются одновременно широкая полоса по переходному затуханию и высокая направленность, то наиболее просто увеличить число шлейфов в мосте с одинаковыми шлейфами.

Таблица 11.3

Параметры мостов в зависимости от числа одинаковых шлейфов

Тип моста и размеры волновода, мм	Число шлейфов, k	Полоса, % по уровню		Максимальная направленность (dB) в полосе по уровню (3 ± 0.5) dB	Минимальный КБВ в полосе по уровню (3 ± 0.5) dB
		(3±0.2) dB	(3±0.5) dB		
Недисперсионный коаксиальный или полосковый мост	5	25	41	15	0,8
	10	31	44	22	0,89
	20	34	48	30	0,95
	∞	36	49	∞	1,0
Волноводный мост 10×23 , $\lambda_0 = 34$	5	11	19	15	0,8
	10	14	20	22	0,89
	20	15	22	30	0,95
	∞	16	22,5	∞	1,0
Волноводный мост 34×72 , $\lambda_0 = 100$	5	13	22	15	0,8
	10	16	23	22	0,89
	20	18	25	30	0,95
	∞	19	26	∞	1
Волноводный мост 45×90 , $\lambda_0 = 100$	5	17	29	15	0,8
	10	22	30	22	0,89
	20	24	33	30	0,95
	∞	25	34	∞	1

В табл. 11.4 даны параметры недисперсионного моста из неодинаковых звеньев [1].

Таблица 11.4

Параметры недисперсионного моста из различных звеньев

Число шлейфов, k	Полоса, % по уровню		Максимальная направленность в полосе по уровню		Минимальный КБВ в полосе по уровню
	(3±0.2) dB	(3±0.5) dB	(3±0.2) dB	(3±0.5) dB	
3	18	32	24	14	0,88
4	22	38	34	14	0,95

Соответствующие данные для относительных волновых сопротивлений шлейфов приведены на рис. 11.6, а и б.

Таблица 11.6

Параметры направленного ответвителя с полной связью

11.5. ВОЛНОВОДНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ С ПОЛНОЙ СВЯЗЬЮ

a) *Щелевой направленный ответвитель с полной связью.* Щелевой направленный ответвитель с полной связью по конструкции аналогичен волноводному щелевому мосту (см. § 11.2); отличие состоит лишь в длине щели и методике согласования. Условие полной связи:

$$\theta = \theta_0 = (2n - 1)\pi \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (11.20)$$

а длина щели и рабочая полоса определяются из (11.5) и (11.6). Данные по широкодолготности, рассчитанные для идеализированной согласованной системы, сведены в табл. 11.5.

Таблица 11.5

Размеры волновода, мм	Полоса, % по уровню затухания	
	(0+0,2) дБ	(0+0,5) дБ
10×23 $\lambda_0 = 34$	17	27
34×72 $\lambda_0 = 100$	18	28
45×90 $\lambda_0 = 100$	21	33
Система без дисперсии $\left(\frac{2\Delta\theta}{\theta_0}\right)$	26	42

b) *Волноводный многодырочный направленный ответвитель с полной связью.* Волноводный многодырочный направленный ответвитель с полной связью по конструкции не отличается от соответствующего моста; разница лишь в числе и диаметре отверстий связи. Величина переходного затухания по-прежнему рассчитывается по формулам (11.7) — (11.11), но эквивалентная проводимость отверстия должна быть в этом случае равна

$$Y = \frac{\pi}{20} \sin \frac{\pi}{k}. \quad (11.21)$$

Если число отверстий выбрано, то на средней длине волны

$$Y = Y_0 = \sin \frac{\pi}{k}, \quad (11.22)$$

и из формулы (11.12) определяется диаметр отверстия. Полоса по переходному затуханию определяется из соотношения (11.13). Параметры направленного ответвителя даны в табл. 11.6.

Размер волновода и длина волны, мм	Число отверстий*	Полоса, % по уровню переходного затухания		Минимальная направленность в полосе по уровню переходного затухания 0,2 дБ	Минимальный КБВ в полосе по уровню переходного затухания 0,2 дБ
		(0+0,2) дБ	(0+0,5) дБ		
10×23 $\lambda_0 = 34$	20	15	22	20	0,8
	50	14	21	29	0,92
	100	13	20	34	0,95
	∞	13	20	∞	1
34×72 $\lambda_0 = 100$	20	17	26	20	0,8
	50	16	25	29	0,92
	100	15	23	34	0,95
	∞	15	23	∞	1
45×90 $\lambda_0 = 100$	20	23	35	20	0,8
	50	21	34	29	0,92
	100	20	31	34	0,95
	∞	20	31	∞	1
Система без дисперсии $\left(\frac{2\Delta\theta}{\theta_0}\right)$	20	33	50	20	0,8
	50	31	49	29	0,92
	100	30	45	34	0,95
	∞	30	45	∞	1

Пример. Задано: средняя частота $f_0 = 8800$ Мег; размеры волновода 10×23 мм.

Определить параметры многодырочного направленного ответвителя с полной связью.

1. Число отверстий выбираем $k = 20$.

2. Проводимость отверстия в эквивалентной схеме на средней частоте диапазона

$$Y_0 = \sin \frac{\pi}{k} = \sin \frac{3,14}{20} = 0,157.$$

3. Диаметр отверстия связи¹

¹ Стенка предполагается бесконечно тонкой; учет конечной толщины стенки приводит к некоторой поправке; последняя невелика при больших диаметрах отверстий. Расчет поправки для малых отверстий см. далее.

$$d = a \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \frac{b}{\Lambda} \sin \frac{\pi}{k}} = 23 \sqrt[3]{\frac{6}{3,14} \frac{10}{50,8}} 0,157 = 9 \text{ мм.}$$

4. Расстояние между центрами отверстий

$$l = \frac{\Delta_0}{4} = \frac{50,8}{4} = 12,7 \text{ мм.}$$

и общая длина ответвителя

$$l_0 = l(k-1) = 12,7 \cdot 19 = 248 \text{ мм.}$$

5. Полоса полной связи $\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0}$ по уровню 0,2 дБ согласно данным табл. 11.6 составляет 15%.

Направленность и КБВ по данным этой же таблицы равны соответственно: $D > 20$ дБ; КБВ $> 0,8$.

6. Различия между расчетными и экспериментальными данными показаны в табл. 11.7; они лежат в пределах точности измерений.

Таблица 11.7

Наименование параметра	Расчетные данные	Экспериментальные данные
Полоса пропускания по уровню 0,2 дБ	15%	15%
Минимальная направленность в полосе	> 20 дБ	> 22 дБ
Минимальный КБВ в полосе	$> 0,8$	$> 0,79$

11.6. НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ И МОСТЫ НА СВЯЗАННЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ЛИНИЯХ

a) Одноступенчатые направленные ответвители. Направленные ответвители на связанных симметричных линиях (рис. 11.7) состоят из двух коаксиальных или полосковых линий, связанных электрической и магнитной связью. При правильном соотношении этих связей система обладает идеальной направленностью и согласованием в неограниченной полосе частот [5, 6]¹, рассчитывается лишь переходное затухание.

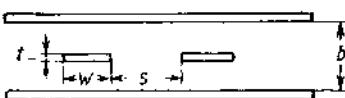


Рис. 11.7. Направленный ответвитель на связанных симметричных линиях.

¹ Без учета влияния высших типов волн, т. е. в пределах так называемой «одноволновой» теории.

Направленный ответвитель на связанных линиях принадлежит к восьмиполюсникам с направленностью 2-го рода, т. е. мощность поступает в плечи 2 и 3. Сдвиг фаз между напряжениями в этих плечах равен $\frac{\pi}{2}$.

Частотная характеристика системы определяется выражением

$$C_{12} = 10 \lg \frac{1}{|S_{12}|^2} = 10 \lg \{C_0 + (C_0 - 1) \operatorname{ctg}^2 \theta\}, \quad (11.23)$$

где

$$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda}; \quad (11.24)$$

l — длина участка связи;

C_0 — постоянная, определяющая переходное затухание на средней длине волны.

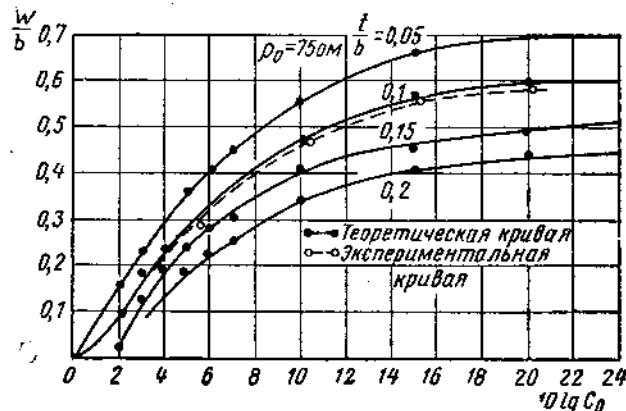


Рис. 11.8. Зависимость величины $\frac{\omega}{\lambda_0}$ от переходного затухания в полосковом направленном ответвителе.

Длина участка связи выбирается равной

$$l = \frac{\lambda_0}{4}. \quad (11.25)$$

Рабочая полоса системы зависит от уровня переходного затухания; эта зависимость приведена в табл. 11.8.

Конструктивные параметры (рис. 11.7) полосковой линии, т. е. ширина полоски w ; толщина t , расстояние между полосками s ; расстояние между экранами b определяются по графикам на рис. 11.8 — 11.10, рассчитанным для нагрузочных сопротивлений $R = 75 \text{ ом}$ и $R = 50 \text{ ом}$ при $\frac{t}{b} = \text{const}$.

¹ В § 5.6 приведены более подробные материалы.

Таблица 11.8
Значения переходного затухания и рабочей полосы системы

Переходное затухание на средней длине волны, дБ	Полоса, % по уровню $+0,2 \text{ дБ}$ отклонения от среднего значения	Полоса, % по уровню $+0,5 \text{ дБ}$ отклонения от среднего значения
2	45	75
3	38	64
5	33	55
10	27	48
20	24	45

По оси абсцисс здесь отложена величина переходного затухания на средней длине волны, т. е. $10 \lg C_0$.

Пример. Задано $10 \lg C_0 = 10 \text{ дБ}$; $R = 75 \text{ ом}$; $\lambda_0 = 20 \text{ см}$. Определить размеры полоскового направленного ответвителя.

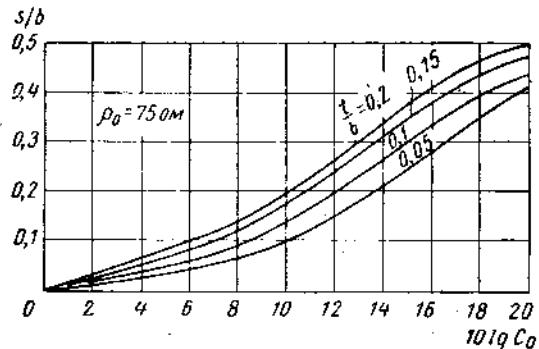


Рис. 11.9. Зависимость величины s/b от переходного затухания в полосковом направленном ответвилеле.

1. Из конструктивных соображений задаем расстояние между экранами $b = 16 \text{ мм}$, толщину полосок $t = 1,6 \text{ мм}$.

2. По кривым на рис. 11.8 и 11.9 определяем величины $\frac{w}{b}$

$$\text{и } \frac{s}{b}:$$

$$\frac{w}{b} = 0,47; \quad \frac{s}{b} = 0,14,$$

откуда $w = 7,5 \text{ мм}$; $s = 2,24 \text{ мм}$.

3. Длина области связи

$$l = \frac{\lambda_0}{4} = 50 \text{ мм.}$$

4. Полоса переходного затухания по уровню $(10 + 0,5) \text{ дБ}$ согласно данным табл. 11.8 составляет 48%.

Направленность и согласование направленных ответвителей на связанных линиях теоретически идеальны; практически они зависят от точности выполнения размеров полосок, качества перехода с полосковой линии на коаксиальную и КВВ оконечной нагрузки.

При тщательном выполнении можно обеспечить направленность около 20 дБ и $\text{КВВ} > 0,8$.

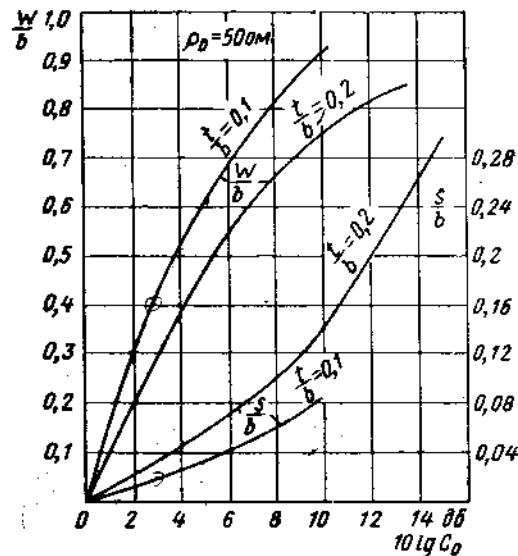


Рис. 11.10. Зависимость величин w/b и s/b от переходного затухания в полосковом направленном ответвилеле.

б) *Двухступенчатые направленные ответвители.* Многоступенчатые направленные ответвители представляют собой каскадное включение нескольких направленных ответвителей, рассмотренных в предыдущем параграфе. При нечетном числе ступеней и полной симметрии система может приобрести свойства моста.

В пределах приближения одноволновой теории многоступенчатый направленный ответвитель, так же, как и одноступенчатый, обладает идеальной направленностью и согласованием в неограниченной полосе частот.

Частотная характеристика переходного затухания многоступенчатого направленного ответвителя является полиномом по $\cos^2 \theta$; это дает возможность применить чебышевскую или максимально плоскую зависимость.

Таблица 11.9

Двухступенчатый направленный ответвитель с чебышевской характеристикой

$L_0, \text{дБ}$	$\delta, \text{дБ}$	r_1	r_2	λ_2/λ_1
3	0,1	1,329	0,231	2,346
	0,2	1,351	0,260	2,779
	0,5	1,379	0,323	3,689
	1,0	1,391	0,397	4,850
5	0,1	0,878	0,166	2,195
	0,2	0,891	0,185	2,566
	0,5	0,908	0,225	3,333
	1,0	0,914	0,272	4,298
10	0,1	0,421	0,086	2,081
	0,2	0,426	0,095	2,406
	0,5	0,433	0,113	3,065
	1,0	0,437	0,135	3,897
15	0,1	0,228	0,047	2,050
	0,2	0,229	0,052	2,367
	0,5	0,233	0,061	3,008
	1,0	0,235	0,073	3,799
20	0,1	0,126	0,026	2,045
	0,2	0,127	0,029	2,354
	0,5	0,129	0,034	2,987
	1,0	0,130	0,040	3,773
25	0,1	0,070	0,014	2,041
	0,2	0,071	0,016	2,352
	0,5	0,072	0,019	2,983
	1,0	0,073	0,022	3,764
30	0,1	0,039	0,008	2,040
	0,2	0,040	0,009	2,350
	0,5	0,040	0,011	2,981
	1,0	0,040	0,013	3,761

Двухступенчатый направленный ответвитель с максимально плоской характеристикой

$L_0, \text{дБ}$	$\delta, \text{дБ}$	r_1	r_2	λ_2/λ_1
3	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			
5	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			
10	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			
15	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			
20	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			
25	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			
30	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1,0			

Чебышевская характеристика имеет вид [6]

$$\left| \frac{S_{12}}{S_{13}} \right|^2 = \beta^2 - h^2 T_k^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right),$$

где β^2 — постоянная, определяющая величину переходного затухания на средней длине волны; h, S — амплитудный и масштабный коэффициенты; T_k — полином Чебышева 1-го рода k -го порядка.

Максимально плоская характеристика задается выражением

$$\left| \frac{S_{12}}{S_{13}} \right|^2 = \beta^2 - h^2 \left(\frac{\cos \theta}{S} \right)^{2k}. \quad (11.26)$$

В табл. 11.9 приведены параметры двухступенчатых направленных ответвителей. Здесь $10 \lg C_0$ — затухание на средней длине волны; δ — максимальное отклонение от $10 \lg C_0$ в рабочем диапазоне; r_1 и r_2 — сопротивления связи первой и второй ступеней; $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ — коэффициент перекрытия диапазона, связанный с полосой пропускания соотношением

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} = 2 \frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1}. \quad (11.27)$$

Сопротивления связи r_1 и r_2 в свою очередь просто связаны с параметром C_0 :

$$C_0 = \frac{1 + r^2}{r^2}, \quad (11.28)$$

что дает возможность определять конструктивные параметры ступеней, пользуясь данными табл. 11.9 и графиками на рис. 11.8 — 11.10 (либо таблицами § 5.6).

в) Трехступенчатый мост [7, 8]. Трехступенчатый мост имеет симметричную структуру ($r_1 = r_3$), что обеспечивает фазовый сдвиг между напряжениями в плечах 2 и 3, равный $\frac{\pi}{2}$ на всех частотах.

Частотная характеристика деления мощности при правильном выборе сопротивлений связи близка к чебышевской.

Параметры трехступенчатого моста сведены в табл. 11.10.

Пример 1. Требуемые параметры двухступенчатого направленного ответвителя: переходное затухание $10 \lg C_0 = 5 \text{ дБ}$; допуск на переходное затухание $\delta = 0,5 \text{ дБ}$; длинноволновая граница диапазона $\lambda_2 = 27 \text{ см}$; волновые сопротивления входа и выхода $R = 75 \text{ ом}$; тип характеристики — чебышевская.

1. Из табл. 11.9 находим:

$$r_1 = 0,908; \quad r_2 = 0,225; \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 3,33.$$

Таблица 11.10

Параметры трехступенчатого моста

Номинальное переходное затухание моста, дБ	Максимальное отклонение от номинала, дБ	Нормированные сопротивления связи ступеней		Коэффициент перекрытия диапазона $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$
		$r_1 = r_3$	r_2	
3	0,1	0,136	1,401	2,450
	0,2	0,154	1,437	3,000
	0,5	0,192	1,492	4,064
	1,0	0,236	1,530	5,320

2. Коротковолновая граница диапазона

$$\lambda_1 = \frac{27}{3,33} = 8,1 \text{ см}$$

и длина ступенек

$$l = \frac{1}{2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 3,15 \text{ см.}$$

3. Переходные затухания ступенек:

$$10 \lg C_0^I = 10 \lg \frac{1 + r_1^2}{r_1^2} = 3,46 \text{ дБ,}$$

$$10 \lg C_0^{II} = 10 \lg \frac{1 + r_2^2}{r_2^2} = 13,12 \text{ дБ.}$$

По графикам на рис. 11.8 и 11.9 находим размеры ступеней:

$$s_1 = 0,6 \text{ мм; } s_2 = 3,7 \text{ мм; }$$

$$w_1 = 3,3 \text{ мм; } w_2 = 8,35 \text{ мм.}$$

Пример 2. Требуемые параметры трехступенчатого моста: переходное затухание $10 \lg C_0 = 3 \text{ дБ}$; допуск на переходное затухание $\delta = 0,2 \text{ дБ}$; длинноволновая граница диапазона $\lambda_2 = 30 \text{ см}$; волновые сопротивления входа и выхода $R = 75 \text{ ом}$.

1. Из табл. 11.10 $r_1 = r_3 = 0,154$; $r_2 = 1,437$; $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 3,0$.

2. Коротковолновая граница диапазона $\lambda_1 = \frac{30}{3} = 10 \text{ см}$ и длина ступенек $l = \frac{1}{2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 3,75 \text{ см.}$

3. Переходное затухание одиночной ступеньки

$$10 \lg C_0^I = 10 \lg C_0^{III} = 10 \lg \frac{1 + r_1^2}{r_1^2} = 16,35 \text{ дБ,}$$

$$10 \lg C_0^{II} = 10 \lg \frac{1 + r_2^2}{r_2^2} = 1,71 \text{ дБ.}$$

По графикам на рис. 11.8 и 11.9 определяем размеры ступенек:

$$s_1 = s_3 = 5,2 \text{ мм; } s_2 = 0,23 \text{ мм; } \\ w_1 = w_3 = 8,9 \text{ мм; } w_2 = 1,68 \text{ мм.}$$

11.7. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ СО СЛАБОЙ СВЯЗЬЮ

Ответвители с чебышевской характеристикой направленности. Ответвитель этого типа представляет собой цепочку восьмиполюсников со слабой связью как на каждом элементе, так и во всей системе в целом. При этих условиях возможно применение приближенных соотношений синтеза по направленности.

Если положить

$$|S_{12}| = \left| h T_{k-1} \left(\frac{\cos \theta}{S} \right) \right|, \quad (11.29)$$

где S_{12} — элемент матрицы рассеяния системы; h, S — амплитудный и масштабный коэффициенты; T_k — полином Чебышева 1-го рода k -го порядка; k — число элементов связи;

$$0 = \frac{2\pi l}{\Delta};$$

l — расстояние между элементами связи, то достижимый коэффициент перекрытия диапазона по направленности составляет

$$\frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} = \frac{\pi - \arccos S}{\arccos S}; \quad (11.30)$$

$$S = \frac{1}{\operatorname{ch} \left(\frac{1}{k-1} \operatorname{ar ch} \sqrt{D} \right)}, \quad (11.31)$$

где $D = \frac{|S_{12}|^2}{h^2}$ — допуск на направленность (наименьшее значение коэффициента направленности в полосе);

 Λ_1, Λ_2 — границы рабочего диапазона волн ответвителя.

Длина соединительных линий между восьмиполюсниками цепочки составляет

$$l = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2}, \quad (11.32)$$

т. е. четверть длины волны, соответствующей средней частоте диапазона.

Таблица 11.11

Направленные ответвители со слабой связью и

S	$\frac{A_2}{A_1}$	$k = 2$		$k = 3$			$k = 4$		
		$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$
0,1	1,13	20,00	13,98	45,97	33,98	39,91	71,97	53,98	
0,2	1,29	13,97	7,96	33,80	21,94	27,60	53,70	35,92	
0,3	1,48	10,15	4,43	26,52	14,89	20,10	42,79	25,35	
0,4	1,71	7,95	1,94	21,20	9,90	14,40	34,79	17,86	
0,5	2,0	6,13	0,00	16,88	6,02	9,54	28,27	12,04	
0,6	2,38	4,43	— 1,59	13,16	2,85	4,99	22,60	7,29	
0,7	2,95	3,09	— 2,93	9,77	0,18	0,35	17,34	3,27	
0,8	3,88	1,94	— 4,08	6,54	— 2,15	— 5,00	12,17	0,21	
0,9	5,96	0,91	— 5,11	3,34	— 4,19	— 9,51	6,66	— 3,85	

Чебышевской характеристикикой направленности

$k = 4$		$k = 5$				$k = 6$			
$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$
63,43	97,97	73,98	85,93	89,43	123,96	93,98	107,87	113,97	
45,10	73,63	49,90	61,58	64,99	93,53	63,88	77,50	83,35	
34,07	59,05	35,81	47,03	50,29	75,37	46,27	59,43	65,05	
25,88	48,39	25,81	36,34	39,89	61,99	33,77	46,24	51,53	
19,08	39,70	18,06	27,60	30,37	51,18	24,08	35,56	40,42	
12,95	32,13	11,73	19,89	22,30	41,66	16,16	26,27	30,55	
6,97	25,08	6,37	12,57	14,53	32,85	9,46	17,59	21,18	
0,42	18,09	1,73	4,91	6,34	24,08	3,67	8,79	11,45	
— 8,18	10,41	— 2,36	— 4,75	— 3,96	14,34	— 1,44	— 1,89	— 0,31	

S	$\frac{A_2}{A_1}$	$k = 7$					$k = 8$		
		$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_3}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_4}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	
0,1	1,13	149,96	113,98	129,46	137,36	139,84	175,69	133,98	
0,2	1,29	113,43	77,86	93,86	100,81	103,24	133,40	91,83	
0,3	1,48	91,64	56,72	71,47	78,94	81,28	107,92	67,18	
0,4	1,71	75,64	41,73	55,78	62,86	65,07	89,25	49,69	
0,5	2,00	62,56	30,10	43,17	49,71	51,53	74,05	36,12	
0,6	2,38	51,20	20,59	32,37	38,12	39,86	60,74	25,04	
0,7	2,95	40,62	12,57	22,28	27,20	28,76	48,40	15,66	
0,8	3,88	30,10	5,61	12,30	16,04	17,22	36,11	7,55	
0,9	5,96	18,35	— 0,53	0,61	2,73	3,38	22,39	0,39	

$k = 7$				$k = 8$				$k = 9$			
$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_3}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_4}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_3}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$	$\frac{C_1}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_2}{h}, \text{дБ}$	$\frac{C_3}{h}, \text{дБ}$	$D, \text{дБ}$
150,79	160,28	164,67	201,95	153,98	171,95	182,77	188,76	190,68			
108,38	117,69	122,01	153,24	105,81	123,15	134,15	140,02	141,91			
83,26	92,27	96,44	124,20	77,64	94,88	105,19	110,87	112,69			
65,08	73,64	77,00	102,77	57,65	74,20	84,02	89,12	91,15			
50,53	58,48	62,15	85,42	42,14	57,70	66,88	71,96	73,51			
38,06	45,20	48,50	70,27	29,47	43,70	51,96	56,49	57,93			
26,72	32,81	35,63	56,17	18,76	30,98	38,12	42,01	43,25			
15,74	20,28	22,60	42,13	9,48	18,67	24,24	27,11	28,27			
— 2,86	5,67	6,97	26,44	1,29	4,91	8,30	10,21	10,80			

Продолжение табл. 11.11

S	$\frac{A_2}{A_1}$	$k = 10$					
		D, дБ	$\frac{C_1}{h}$, дБ	$\frac{C_2}{h}$, дБ	$\frac{C_3}{h}$, дБ	$\frac{C_4}{h}$, дБ	$\frac{C_5}{h}$, дБ
0,1	1,13	227,95	173,98	192,98	204,95	212,27	215,77
0,2	1,29	173,15	119,79	138,52	150,29	157,48	160,92
0,3	1,48	140,48	88,10	106,36	117,80	124,75	128,07
0,4	1,71	116,48	65,60	83,17	94,11	100,74	103,90
0,5	2,00	96,93	48,16	64,75	74,99	81,17	84,12
0,6	2,38	79,81	33,91	49,12	58,43	64,03	66,69
0,7	2,95	63,94	21,86	35,10	43,16	48,00	50,30
0,8	3,88	48,15	11,42	21,63	27,99	31,13	33,64
0,9	5,96	30,49	2,21	6,87	10,78	13,20	14,84

	$k = 11$						
	D, дБ	$\frac{C_1}{h}$, дБ	$\frac{C_2}{h}$, дБ	$\frac{C_3}{h}$, дБ	$\frac{C_4}{h}$, дБ	$\frac{C_5}{h}$, дБ	
	253,95	193,98	213,89	226,89	235,36	240,19	241,76
	193,06	133,77	153,42	166,21	174,53	179,27	180,78
	156,75	98,55	117,73	130,17	138,75	142,83	144,31
	130,08	73,56	92,05	103,96	111,67	116,02	117,47
	108,37	54,18	71,68	82,87	90,08	94,16	95,49
	89,35	38,35	54,47	64,68	71,23	74,94	76,14
	71,71	24,96	39,91	48,01	53,69	56,90	57,95
	54,17	13,35	24,48	31,57	36,10	38,66	39,39
	34,57	3,10	8,70	13,13	16,02	17,63	18,19

Если все звенья симметричны и не направлены, то для α -го звена имеем:

$$S_{12}^\alpha = S_{14}^\alpha = C_\alpha \quad (11.33)$$

где C_α полагаем действительной или чисто мнимой величиной, причем затухание элемента связи равно $10 \lg \frac{1}{C_\alpha^2}$.

Значения C_α определяются по табл. 11.11, где даны также величины коэффициента перекрытия диапазона $\frac{\Lambda_2}{\Lambda_1}$ и допуск на направленность D .

Для вычисления требуемого переходного затухания $10 \lg \frac{1}{C_\alpha^2}$ α -го звена необходимо число, найденное из графы $\frac{C_\alpha}{h}$ (дБ), вычесть из заданной величины допуска на обратное затухание $10 \lg \frac{1}{h^2}$, т. е.

$$10 \lg \frac{1}{C_\alpha^2} = 10 \lg \frac{1}{h^2} - 10 \lg \frac{C_\alpha^2}{h^2}. \quad (11.34)$$

Ответвители с максимально плоской характеристикой направленности. В этом случае обратный коэффициент пропускания имеет следующую частотную характеристику:

$$|S_{12}| = \left| h \left(\frac{\cos \theta}{S} \right)^{k-1} \right|, \quad (11.35)$$

откуда

$$S = \left(\frac{1}{V D} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (11.36)$$

а коэффициент перекрытия диапазона определяется по-прежнему из (11.30).

Параметры звеньев определяются из соотношения

$$\frac{C_\alpha}{|S_{14}|} = \frac{1}{2^{k-1}} \binom{k-1}{\alpha-1}, \quad (11.37)$$

где $\binom{k-1}{\alpha-1}$ — биноминальный коэффициент.

В табл. 11.12 даны значения $\frac{|S_{14}|}{C_\alpha}$ для различного числа элементов.

Таблица 11.12

k	$\frac{1}{C_\alpha}$	$\frac{ S_{14} }{C_\alpha}$	$\frac{ S_{14} }{C_2}$	$\frac{ S_{14} }{C_4}$	$\frac{ S_{14} }{C_6}$	$\frac{ S_{14} }{C_8}$	$\frac{ S_{14} }{C_{10}}$	$\frac{ S_{14} }{C_{12}}$	$\frac{ S_{14} }{C_{14}}$
3	12,041	6,020	8,526	12,041	10,03	8,519	10,103	12,177	12,177
4	18,061	8,526	12,041	16,123	20,560	12,601	11,262	15,847	12,933
5	24,082	12,041	16,123	25,241	15,699	19,225	13,200	11,262	14,272
6	30,103	16,123	20,560	30,103	23,059	15,699	12,177	13,761	12,933
7	36,123	20,560	25,241	35,100	27,141	18,622	15,847	12,933	12,933
8	42,144	25,241	30,103	40,206	31,419	21,876	18,355	16,076	13,577
9	48,164	30,103	35,100	45,398	35,856	25,398	21,181	17,815	14,438
10	54,185	35,100	40,423	50,663	40,423	29,140	24,269	20,449	15,963
11	60,206	40,206	45,107	61,365	33,066	37,148	31,127	23,317	17,923
12	66,226	45,398	51,419	66,787	37,148	27,606	24,269	20,449	15,963
13	72,247	50,663	55,988	72,247	41,365	45,699	34,818	26,372	20,188
14	78,267	55,988	61,365	84,288	49,885	49,885	45,107	33,066	13,997
15	84,288	61,365	66,787	90,308	72,247	54,755	59,673	45,107	13,997
16	90,308	66,787	72,247	96,329	72,247	59,673	77,752	59,673	14,448
17	96,329	72,247	77,752	102,350	77,752	77,752	77,752	77,752	14,448

Искомое затухание α -го элемента равно

$$10 \lg \frac{1}{C_\alpha^2} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2} - 10 \lg \frac{C_\alpha^2}{|S_{14}|^2}. \quad (11.38)$$

В отличие от предыдущего случая коэффициент пропускания элемента не зависит от масштабного множителя S ; он определяется лишь числом звеньев k и заданным уровнем прямой передачи в системе $|S_{14}|$.

11.8. ЭФФЕКТИВНАЯ НАПРАВЛЕННОСТЬ. ПРИМЕРЫ

В предыдущих разделах согласование всех плеч предполагалось идеальным; соответствующая величина направленности называется собственной направленностью ответвителя. Учет рассогласования нагрузок приводит к понятию эффективной направленности ответвителя; в общем случае эта величина может быть как меньше, так и больше собственной направленности.

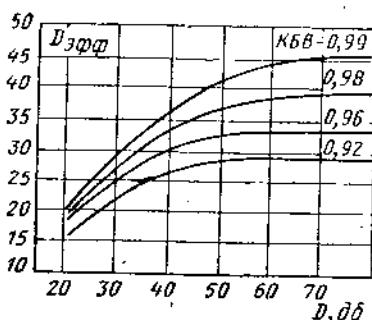


Рис. 11.11. Графики минимальной эффективной направленности ответвителя.

Формула для эффективной направленности имеет вид

$$\sqrt{D_{\text{эфф}}} = \frac{S_{14} + (S_{12} S_{13} - S_{14} S_{22}) \Gamma_{22} + (S_{13} S_{12} - S_{14} S_{33}) \Gamma_{33} - 2 S_{11} S_{14} \Gamma_{11}}{S_{12} + (S_{13} S_{14} - S_{12} S_{44}) \Gamma_{22} + (S_{13} S_{14} - S_{12} S_{33}) \Gamma_{33}}. \quad (11.39)$$

Если Γ_{11} и Γ_{33} (коэффициенты отражения от нагрузок плеч 1 и 3) пренебрежимо малы, то в минимуме

$$D_{\text{эфф}} \geq 10 \lg \frac{D_{\text{собств}}}{(1 + \sqrt{D_{\text{собств}}} \Gamma_{22})^2}. \quad (11.40)$$

Графики минимальной эффективной направленности в зависимости от согласования нагрузки в плече 2 приведены на рис. 11.11.

Пример 1. Направленный ответвитель представляет собой два одинаковых прямоугольных волновода, связанных рядом круглых ненаправленных отверстий в общей узкой стенке.

Требуется прямое затухание

$$10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2} = 50 \text{ дБ};$$

минимальное обратное затухание $10 \lg \frac{1}{h^2} = 90 \text{ дБ}$; диапазон $\lambda_1 = 8 \text{ см}$; $\lambda_2 = 12 \text{ см}$; волновод $72 \times 34 \text{ мм}$. Характеристика направленности — чебышевская.

1. В соответствии с заданными условиями эффективная направленность должна быть $90 - 50 = 40 \text{ дБ}$. Если считать, что КВВ нагрузки в плече 2 составляет 0,98, то для получения эффективной направленности 40 дБ собственную направленность ответвителя согласно графику на рис. 11.11 следует иметь

$$D_c = 70 \text{ дБ}, \text{ т. е. } D_c = 10^7$$

$$2. \Delta_1 = \frac{8}{\sqrt{1 - \left(\frac{8}{14,4}\right)^2}} = 9,5 \text{ см},$$

$$\Delta_2 = \frac{12}{\sqrt{1 - \left(\frac{12}{14,4}\right)^2}} = 22 \text{ см},$$

откуда масштабный коэффициент

$$S = \cos \frac{\pi}{1 + \Delta_2/\Delta_1} = \cos \frac{\pi}{1 + 2,3} \approx 0,6.$$

3. Число звеньев

$$k = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{D_c}}{\operatorname{ar ch} \frac{1}{S}} + 1 = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{10^7}}{\operatorname{ar ch} \frac{1}{0,6}} + 1 \approx 9.$$

4. По табл. 11.11 для $k = 9$ и $S = 0,6$

$$10 \lg \frac{C_1^2}{h^2} = 29,47 \text{ дБ}; \quad 10 \lg \frac{C_4^2}{h^2} = 56,49 \text{ дБ};$$

$$10 \lg \frac{C_2^2}{h^2} = 43,70 \text{ дБ}; \quad 10 \lg \frac{C_5^2}{h^2} = 57,93 \text{ дБ};$$

$$10 \lg \frac{C_3^2}{h^2} = 51,96 \text{ дБ}$$

и уточненное значение требуемой собственной направленности D_c составляет

$$D_c = 70,27 \text{ дБ}.$$

$$\text{Так как } D_c (\text{дБ}) = 10 \lg \frac{|S_{14}|^2}{h^2} = 10 \lg \frac{1}{h^2} - 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2},$$

то

$$10 \lg \frac{1}{h^2} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2} + D_c$$

т. е. $10 \lg \frac{1}{h^2} = 50 + 70,27 = 120,27 \text{ дБ.}$

Искомые затухания звеньев согласно (11.34) равны

$$10 \lg \frac{1}{C_1^2} = 120,27 - 29,47 = 90,80 \text{ дБ; } 10 \lg \frac{1}{C_4^2} = 63,28 \text{ дБ}$$

и аналогично

$$10 \lg \frac{1}{C_2^2} = 77,10 \text{ дБ; } 10 \lg \frac{1}{C_5^2} = 62,83 \text{ дБ;}$$

$$10 \lg \frac{1}{C_3^2} = 68,8 \text{ дБ,}$$

причем

$$C_1 = C_9; \quad C_2 = C_8; \quad C_3 = C_7; \quad C_4 = C_6.$$

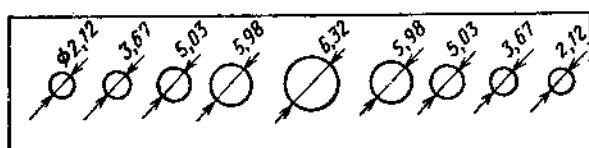


Рис. 11.12. Эскиз общей узкой стенки волноводов чебышевского направленного ответвителя.

5. Из эквивалентной схемы отверстия (рис. 11.4) следует формула для его затухания

$$20 \lg \frac{12}{\pi} \cdot \frac{b}{\Lambda} \left(\frac{a}{d} \right)^3,$$

откуда

$$\begin{aligned} d_1 &= 2,12 \text{ мм; } d_3 = 5,03 \text{ мм; } d_5 = 6,32 \text{ мм;} \\ d_2 &= 3,67 \text{ мм; } d_4 = 5,98 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Эскиз соответствующей узкой стенки волновода дан на рис. 11.12.

Эти результаты верны для бесконечно тонкой стенки. При конечной толщине стенки приращение затухания составляет

$$\Delta L_{(\text{дБ})} = 32 \frac{t}{d} \sqrt{1 - \left(\frac{1,71 d}{\Lambda_0} \right)^2},$$

где t — толщина стенки.

Пример 2. Условия расчета те же, что и в предыдущем примере. Характеристика направленности — максимально плоская.

1. По-прежнему $D_c = 70 \text{ дБ; } D_c = 10^7$

$$\Lambda_1 = 9,5 \text{ см; } \Lambda_2 = 22 \text{ см; } \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} = 2,3; \quad S \approx 0,6.$$

2. Требуемое число звеньев согласно (11.36)

$$k = \frac{\lg V \bar{D}}{\lg \frac{1}{S}} + 1 = \frac{\lg \sqrt{10^7}}{\lg \frac{1}{0,6}} + 1 \approx 17.$$

3. Переходное затухание отверстий согласно (11.38)

$$10 \lg \frac{1}{C_a^2} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2} + 10 \lg \frac{|S_{14}|^2}{C_a^2},$$

откуда

$$10 \lg \frac{1}{C_1^2} = 50 + 96,33 = 146,33 \text{ дБ}$$

и аналогично

$10 \lg \frac{1}{C_a^2}$	$\frac{1}{C_2}$	$\frac{1}{C_3}$	$\frac{1}{C_4}$	$\frac{1}{C_5}$	$\frac{1}{C_6}$	$\frac{1}{C_7}$	$\frac{1}{C_8}$	$\frac{1}{C_9}$
дБ	122,25	104,75	91,36	81,13	73,32	67,92	64,92	63,99

4. Диаметры отверстий соответственно соотношению

$$\frac{1}{C_a} = \frac{12b}{\pi \Lambda} \left(\frac{a}{d_a} \right)^3$$

равны:

Диаметры отверстий	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
мм	0,257	0,646	1,267	2,113	3,122	4,233	5,196	5,83	6,04

5. Полагая толщину стенки $t = 1 \text{ мм}$, находим окончательные диаметры отверстий с учетом толщины стенки.

Диаметры отверстий	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
мм	0,95	1,50	2,2	3,2	4,3	5,3	6,35	7,05	7,2

6. Сравнивая рассчитанный направленный ответвитель с соответствующим ответвителем при чебышевской характеристике направленности (рис. 11.12), замечаем, что длина последнего в 2 раза меньше, а диаметры отверстий более удобны технологически.

11.9. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Кольцевые делители мощности («гибридные соединения» [12]) позволяют разделить мощность пополам (или в другом заданном отношении) при достаточной развязке между плечами 2 и 3 (рис. 11.13, а). Соединение нескольких колец (рис. 11.13, б) позволяет разделить мощность на 4 и более частей.

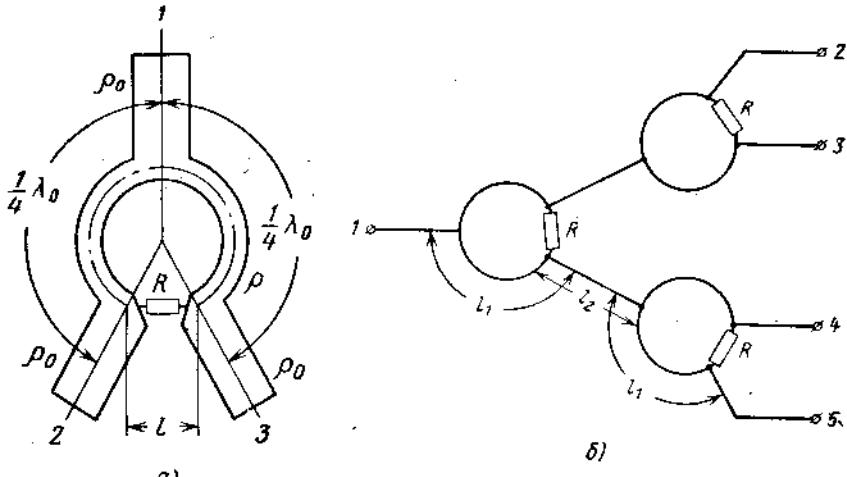


Рис. 11.13. Полосковый кольцевой делитель мощности: а) на два канала (внутренний проводник); б) на четыре канала (схема).

Реализация кольца удобна в полосковом варианте. Расчетные формулы для случая «точечного» сопротивления имеют вид:
величина сосредоточенного сопротивления

$$R = 2\rho_0; \quad (11.41)$$

волновое сопротивление кольца (при равном делении мощности в бесконечной полосе частот)

$$\rho = \sqrt{2} \rho_0; \quad (11.42)$$

длина половины кольца

$$\frac{\lambda_0}{4}, \quad (11.43)$$

где ρ_0 — волновое сопротивление подводящих линий.

Расчетная частотная характеристика развязки между плечами 2 и 3 двухканального делителя с равным делением мощности показана на рис. 11.14. Развязка больше 20 дБ сохраняется в полосе 36%.

В этой же полосе сохраняется входной КБВ больше 0,8 и КБВ со стороны выходных плеч больше 0,9.

Пример.

Задано волновое сопротивление подводящих линий $\rho_0 = 50 \text{ ом}$, средняя длина волны $\lambda_0 = 10 \text{ см}$. Определить параметры кольцевого 3-бб делителя мощности.

1. Величина нагрузочного сопротивления

$$R = 2\rho_0 = 100 \text{ ом}.$$

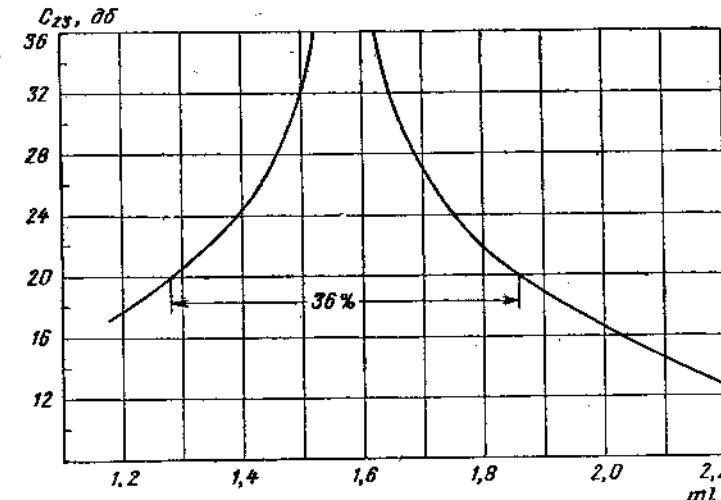


Рис. 11.14. Зависимость развязки между каналами (C_{23}) от $ml = \frac{2\pi l}{\lambda}$ в двухканальном делителе мощности.

Выбираем сопротивление типа МЛТ-0,5-100. Длина корпуса сопротивления $l \approx 11 \text{ мм}$. С учетом подводящих участков выбираем $l = 18 \text{ мм}$.

2. Расстояние от входа до сопротивления R , (в случае, если последнее «точечное») составляет $\lambda_0/4$, т. е. длина кольца в идеализированном случае равна $\lambda_0/2$. Поскольку в нашем случае участок включения сопротивления $l = 18 \text{ мм}$, т. е. сравним с длиной волны, то для компенсации необходимо удлинить кольцо на величину l .

Таким образом, диаметр кольца равен

$$D_{cp} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\lambda_0}{2} + 2l \right) = \frac{1}{3,14} (50 + 36) = 27,3 \text{ мм}.$$

3. Волновое сопротивление кольцевого участка

$$\rho = \sqrt{2} \rho_0 = 70,7 \text{ ом}.$$

Эскиз внутреннего проводника полоскового кольцевого делителя дан на рис. 11.15.

Ширина полосок, рассчитанная по материалам гл. 5, соответствует найденным выше волновым сопротивлениям 50 и 70,7 ом. Расстояние между внешними пластинами полосковой линии принято $b = 10$ мм, а толщина полоски $t = 2$ мм.

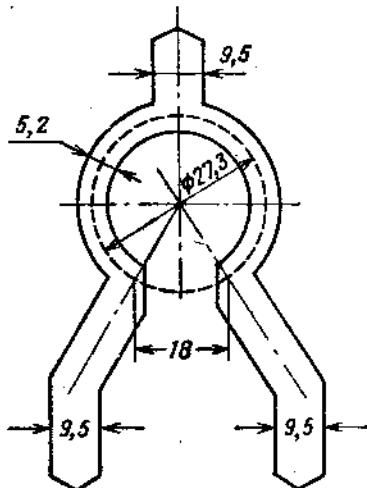


Рис. 11.15. Расчетные размеры внутреннего проводника (к примеру в § 11.9).

11.10. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ МЕЖДУ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВОЛНОВОДАМИ¹

Элементы связи характеризуются переходным затуханием C (дБ) и направленностью D (дБ).

Для сопаралленного элемента связи

$$C = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{14}} \right|; \quad (11.44)$$

$$D = 20 \lg \left| \frac{S_{14}}{S_{12}} \right|. \quad (11.45)$$

Для противонаправленного элемента связи

$$C = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{12}} \right|; \quad (11.46)$$

$$D = 20 \lg \left| \frac{S_{12}}{S_{14}} \right|. \quad (11.47)$$

¹ Здесь использованы материалы Е. С. Жаворонковой.

Для ненаправленного элемента связи

$$C = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{14}} \right|; \quad (11.48)$$

$$D = 0. \quad (11.49)$$

Здесь S_{12} и S_{14} — коэффициенты матрицы рассеяния элемента связи. Индексы соответствуют нумерации плеч восьмиполюсника на рис. 2.1. Ниже приведены параметры некоторых элементов связи, расположенных в общей стенке связанных¹ прямоугольных волноводов. Совпадение данных теории и эксперимента с точностью 0,5 дБ наблюдается при $L/a < 0,35$; $d/a < 0,35$, где L — длина щели; d — диаметр отверстия; a — ширина волновода.

Переходное затухание удобно представить в виде двух слагаемых

$$C = C_1 - C_2, \quad (11.50)$$

где величина C_1 определяет главную часть переходного затухания, зависящую от относительных размеров отверстия и толщины общей стенки; C_2 является поправочной величиной и зависит от относительной длины волны, размеров волновода, положения отверстия связи. Значения величины C_1 далее табулированы. Поправка C_2 подсчитывается по приведенным для каждого частного случая формулам.

КРУГЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В ОБЩЕЙ УЗКОЙ СТЕНКЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ (рис. 11.16)

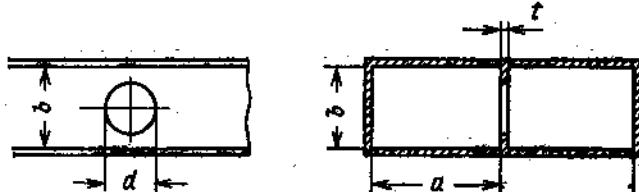


Рис. 11.16. Круглое отверстие в общей узкой стенке двух параллельных волноводов.

Переходное затухание определяется выражением [13]:

$$C = -20 \lg \frac{\pi d^3 \Lambda F_m}{12 a^3 b}, \quad (11.51)$$

где Λ — длина волны в волноводе;

F_m — поправка за счет конечной толщины стенки, равная [14]:

$$F_m = \frac{1}{1 + 1,729 \operatorname{th} \left(0,92 \frac{2t}{d/a} \right)} - \frac{1}{1 + 1,729 \operatorname{ctn} \left(0,92 \frac{2t}{d/a} \right)}, \quad (11.52)$$

где t — толщина стенки.

Выражение (11.51) можно представить в виде (11.50), если обозначить:

$$C_1 = -20 \lg \frac{\pi d^3 F_m}{12 a^3}; \quad (11.53)$$

$$C_2 = 20 \lg \frac{A}{b}. \quad (11.54)$$

Значения C_1 в зависимости от d/a и t/a приведены в табл. 11.13

КРУГЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В ОБЩЕЙ ШИРОКОЙ СТЕНКЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ (рис. 11.17)

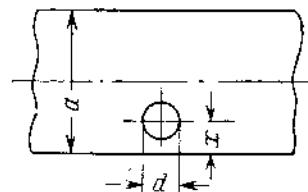


Рис. 11.17. Круглое отверстие в общей широкой стенке двух параллельных волноводов.

Переходное затухание

$$C = -20 \lg \left[\frac{\pi d^3}{3 ab} \left(\frac{F_m}{\Lambda} \sin^2 \frac{\pi x}{a} + \frac{\Lambda F_m}{4 a^2} \cos^2 \frac{\pi x}{a} - \frac{\Delta F_e}{2 \lambda^2} \sin^2 \frac{\pi x}{a} \right) \right], \quad (11.55)$$

где F_m определяется из (11.52), а F_e — из (11.56) [15];

$$F_e = \frac{1}{1 + 1,041 \operatorname{th} \left(1,202 \frac{2t/a}{d/a} \right)} - \frac{1}{1 + 1,041 \operatorname{ctn} \left(1,202 \frac{2t/a}{d/a} \right)}. \quad (11.56)$$

При значении координаты x

$$x = x_0 = \frac{a}{\pi} \arctan \operatorname{tg} \left(\frac{\lambda}{a \sqrt{2}} \frac{F_m}{F_e} \right) \quad (11.57)$$

отверстие становится наиболее широкополосным по переходному затуханию и находит широкое применение при конструировании широкополосных (по переходному затуханию и по направленности) многоэлементных направленных ответвителей (см. § 11.7). При $x = x_0$ переходное затухание равно

$$C = -20 \lg \frac{\pi d^3 F_m}{3 ab \Lambda} \sin^2 \frac{\pi x_0}{a} \quad (11.58)$$

и может быть представлено в виде (11.50), если обозначить

$$C_1 = -20 \lg \frac{\pi d^3 F_m}{3 a^3}; \quad (11.59)$$

$$C_2 = 20 \lg \frac{a^2}{b \Lambda} \sin^2 \frac{\pi x_0}{a}. \quad (11.60)$$

Значения C_1 приведены в табл. 11.14.

УЗКАЯ ЩЕЛЬ В ОБЩЕЙ ШИРОКОЙ СТЕНКЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ (рис. 11.20)

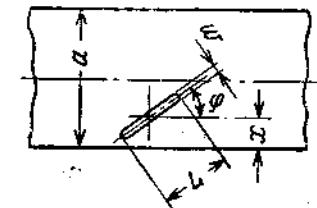


Рис. 11.18. Узкая щель в общей широкой стенке двух параллельных волноводов.

Переходное затухание

$$C = -20 \lg \left[\frac{\pi^2 L^3 F_m}{12 ab \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \left\{ \frac{1}{\Lambda} \sin^2 \frac{\pi x}{a} \sin^2 \varphi + \frac{\Lambda}{4 a^2} \cos^2 \frac{\pi x}{a} \cos^2 \varphi \right\} \right], \quad (11.61)$$

где w — ширина щели (см. рис. 11.18). При $x = 0,25 a$ и $\varphi = 45^\circ$ отверстие наиболее широкополосно по переходному затуханию.

При этом

$$C = -20 \lg \left[\frac{\pi^2 L^3 F_m}{48 a^3 b \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \left(\frac{a}{\Lambda} + \frac{\Lambda}{4a} \right) \right]. \quad (11.62)$$

Выражение (11.62) можно представить в виде (11.50), если обозначить

$$C_1 = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{48 a^3 \left(\ln \frac{4L/a}{w/a} - 1 \right)}; \quad (11.63)$$

$$C_2 = 20 \lg \left[\frac{a}{b} \left(\frac{a}{\Lambda} + \frac{\Lambda}{4a} \right) \right]. \quad (11.64)$$

Значения C_1 в зависимости от L/a , t/a и a/w приведены в табл. 11.15.

Переходное затухание продольной щели ($\phi = 0^\circ$)

$$C = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 \Delta F_m}{48 a^3 b \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \cos^2 \frac{\pi x}{a} \quad (11.65)$$

может быть представлено в виде двух слагаемых C_1 и C_2 , причем главная часть затухания (C_1) по-прежнему определяется выражением (11.63) и табл. 11.15, а поправка имеет вид

$$C_2 = 20 \lg \frac{A}{b} \cos^2 \frac{\pi x}{a}. \quad (11.66)$$

Переходное затухание поперечной щели ($\phi = 90^\circ$)

$$C = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{12 a b \Lambda \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \sin^2 \frac{\pi x}{a}, \quad (11.67)$$

где C_1 имеет вид (11.63), а поправка вычисляется по формуле

$$C_2 = 20 \lg \frac{4a^2}{b \Lambda} \sin^2 \frac{\pi x}{a}. \quad (11.68)$$

УЗКАЯ ЩЕЛЬ В ОБЩЕЙ СТЕНКЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ, КОГДА ШИРОКАЯ СТЕНКА ОДНОГО ИЗ НИХ ПРИМЫКАЕТ К УЗКОЙ СТЕНКЕ ДРУГОГО (рис. 11.19)

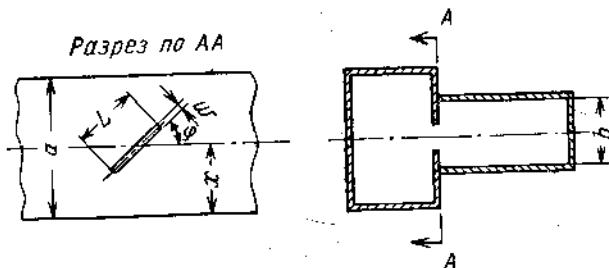


Рис. 11.19. Узкая щель в общей стенке двух параллельных волноводов.

Переходное затухание

$$C = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m \cos \varphi}{24 a^3 b \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \times \\ \times \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{\pi x}{a} \sin^2 \varphi}{\frac{\Lambda^3}{4a^2} \cos^2 \frac{\pi x}{a} \cos^2 \varphi}}. \quad (11.69)$$

При $x = 0,5 a$ и $\varphi = 45^\circ$ переходное затухание становится частотно-независимым

$$C = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{48 a^3 b \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \quad (11.70)$$

Выражение (11.70) можно записать в виде (11.50), если обозначить

$$C_1 = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{48 a^3 \left(\ln \frac{4L/a}{w/a} - 1 \right)}; \quad (11.71)$$

$$C_2 = 20 \lg \frac{a}{b}. \quad (11.72)$$

Выражения (11.71) и (11.63) одинаковы, следовательно, при расчете можно пользоваться табл. 11.15.

Т-ОБРАЗНЫЙ ЭЛЕМЕНТ СВЯЗИ В ОБЩЕЙ ШИРОКОЙ СТЕНКЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ (рис. 11.20)

Переходное затухание

$$C = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{12 a^2 b \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \left(\frac{a}{\Lambda} + \frac{\Lambda}{4a} \right) \quad (11.73)$$

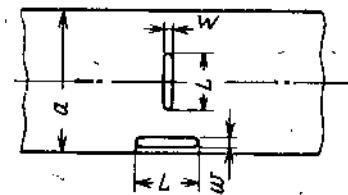


Рис. 11.20. Т-образный элемент связи в общей широкой стенке двух параллельных волноводов.

может быть представлено в виде (11.50), если обозначить

$$C_1 = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{48 a^3 \left(\ln \frac{4L/a}{w/a} - 1 \right)}; \quad (11.74)$$

$$C_2 = 20 \lg \frac{4a}{b} \left(\frac{a}{\Lambda} + \frac{\Lambda}{4a} \right) \quad (11.75)$$

Численные значения C_1 в зависимости от L/a , t/a и a/w даны в табл. 11.15.

Продолжение табл. 11.13

Таблица 11.13
Круглое отверстие связи в узкой стенке

$\frac{d}{a}$	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,02	133,392	136,593	139,791	142,988	146,185
0,03	116,409	118,552	120,691	122,827	124,961
0,04	105,680	107,300	108,913	110,521	112,126
0,05	97,910	99,216	100,514	101,808	103,098
0,06	91,844	92,940	94,030	95,115	96,195
0,07	86,880	87,827	88,767	89,703	90,634
0,08	82,684	88,519	84,347	85,171	85,990
0,09	79,055	79,801	80,542	81,278	82,010
0,1	75,859	76,534	77,204	77,870	78,533
0,11	73,004	73,621	74,234	74,842	75,447
0,12	70,427	70,995	71,559	72,119	72,676
0,13	68,077	68,604	69,126	69,646	70,162
0,14	65,919	66,410	66,897	67,381	67,862
0,15	63,924	64,383	64,840	65,293	65,744
0,16	62,069	62,501	62,930	63,357	63,781
0,17	60,336	60,744	61,149	61,552	61,952
0,18	58,710	59,096	59,480	59,861	60,240
0,19	57,178	57,545	57,910	58,272	58,632
0,2	55,731	56,080	56,428	56,773	57,116
0,21	54,360	54,693	55,024	55,354	55,681
0,22	53,056	53,375	53,692	54,007	54,320
0,23	51,814	52,120	52,423	52,725	53,026
0,24	50,629	50,922	51,213	51,503	51,792
0,25	49,494	49,776	50,057	50,335	50,613
0,26	48,407	48,679	48,949	49,217	49,484
0,27	47,363	47,625	47,885	48,144	48,402
0,28	46,359	46,612	46,863	47,114	47,362
0,29	45,392	45,637	45,880	46,122	46,362
0,3	44,460	44,696	44,932	45,166	45,399
0,31	43,560	43,789	44,017	44,243	44,469
0,32	42,689	42,911	43,132	43,352	43,572
0,33	41,847	42,063	42,277	42,491	42,703
0,34	41,031	41,240	41,449	41,656	41,863
0,35	40,240	40,443	40,646	40,848	41,049
0,36	39,471	39,670	39,867	40,063	40,259
0,37	38,725	38,918	39,110	39,302	39,492
0,38	38,000	38,188	38,375	38,561	38,747
0,39	37,294	37,477	37,660	37,842	38,023
0,4	36,607	36,786	36,964	37,141	37,318
0,41	35,937	36,112	36,286	36,459	36,631
0,42	35,284	35,455	35,625	35,794	35,962
0,43	34,647	34,814	34,980	35,145	35,310
0,44	34,025	34,188	34,351	34,512	34,674
0,45	33,418	33,577	33,736	33,895	34,052

Продолжение табл. 11.13

$\frac{d}{a}$	C ₁ , дб				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,46	32,824	32,980	33,136	33,291	33,445
0,47	32,244	32,397	32,549	32,701	32,852
0,48	31,676	31,826	31,975	32,124	32,272
0,49	31,121	31,267	31,414	31,559	31,705
0,50	30,576	30,720	30,864	31,007	31,149

Таблица 11.14
Круглое отверстие связи в широкой стенке

$\frac{d}{a}$	C ₁ , дб				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,02	121,351	124,551	127,750	130,947	134,444
0,03	104,368	106,511	108,650	110,786	112,919
0,04	93,639	95,259	96,871	98,480	100,085
0,05	85,869	87,174	88,473	89,767	91,057
0,06	79,802	80,899	81,989	83,074	84,154
0,07	74,838	75,785	76,726	77,662	78,593
0,08	70,643	71,478	72,306	73,129	73,949
0,09	67,014	67,760	68,501	69,237	69,969
0,10	63,818	64,493	65,163	65,829	66,491
0,11	60,663	61,580	62,193	62,801	63,406
0,12	58,385	58,954	59,517	60,078	60,635
0,13	56,036	56,562	57,085	57,605	58,121
0,14	53,878	54,369	54,850	55,340	55,821
0,15	51,883	52,342	52,799	53,252	53,703
0,16	50,028	50,460	50,889	51,316	51,740
0,17	48,295	48,703	49,108	49,510	49,911
0,18	46,669	47,055	47,439	47,820	48,199
0,19	45,137	45,504	45,868	46,231	46,591
0,20	43,690	44,039	44,386	44,731	45,074
0,21	42,318	42,652	42,983	43,312	43,640
0,22	41,015	41,334	41,651	41,966	42,279
0,23	39,773	40,079	40,382	40,684	40,985
0,24	38,588	38,881	39,172	39,462	39,751
0,25	37,453	37,735	38,015	38,294	38,572
0,26	36,366	36,637	36,907	37,167	37,443
0,27	35,322	35,584	35,844	36,103	36,361
0,28	34,318	34,571	34,822	35,072	35,321
0,29	33,351	33,595	33,839	34,080	34,321
0,30	32,419	32,655	32,890	33,125	33,358
0,31	31,518	31,747	31,975	32,202	32,428
0,32	30,648	30,870	31,091	31,311	31,530

Продолжение табл. 11.14

$\frac{d}{a}$	$C_1, \text{дб}$				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,33	29,806	30,021	30,236	30,450	30,662
0,34	28,990	29,199	29,408	29,615	29,822
0,35	28,198	28,402	28,605	28,807	29,008
0,36	27,430	27,628	27,826	28,022	28,218
0,37	26,684	26,877	27,069	27,260	27,451
0,38	25,959	26,174	26,334	26,520	26,708
0,39	25,253	25,436	25,619	25,800	25,982
0,40	24,569	24,744	24,962	25,100	25,277
0,41	23,896	24,070	24,248	24,418	24,590
0,42	23,243	23,413	23,583	23,753	23,921
0,43	22,606	22,773	22,939	23,104	23,269
0,44	21,984	22,147	22,309	22,471	22,632
0,45	21,377	21,536	21,695	21,853	22,011
0,46	20,787	20,939	21,095	21,250	21,404
0,47	20,203	20,356	20,508	20,660	20,811
0,48	19,635	19,785	19,934	20,083	20,231
0,49	19,079	19,226	19,372	19,518	19,663
0,50	18,535	18,679	18,823	18,965	19,108

Таблица 11.15

Узкая щель в широкой стенке

$\frac{L}{a}$	$C_1, \text{дб}$ при $\frac{a}{w} = 36$				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,05	98,121	99,212	100,304	101,395	102,487
0,06	93,769	94,678	95,588	96,498	97,407
0,07	90,059	90,839	91,618	92,398	93,178
0,08	86,838	87,520	88,202	88,884	89,563
0,09	83,995	84,601	85,208	85,814	86,420
0,10	81,453	81,998	82,544	83,090	83,636
0,11	79,154	79,650	80,146	80,643	81,139
0,12	77,057	77,512	77,967	78,422	78,877
0,13	75,130	75,520	75,969	76,389	76,809
0,14	73,346	73,736	74,126	74,516	74,905
0,15	71,686	72,050	72,414	72,778	73,142
0,16	70,135	70,476	70,817	71,158	71,499
0,17	68,677	68,998	69,319	69,640	69,961
0,18	67,304	67,607	67,910	68,214	68,517
0,19	66,005	66,292	66,580	66,867	67,154
0,20	64,773	65,046	65,319	65,592	65,865

Продолжение табл. 11.15

$\frac{L}{a}$	$C_1, \text{дб}$ при $\frac{a}{w} = 36$				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,21	63,602	63,861	64,121	64,381	64,641
0,22	62,485	62,733	62,981	63,229	63,477
0,23	61,417	61,655	61,892	62,129	62,367
0,24	60,396	60,623	60,851	61,078	61,305
0,25	59,416	59,634	59,852	60,071	60,289
0,26	58,474	58,684	58,894	59,104	59,314
0,27	57,568	57,770	57,973	58,175	58,377
0,28	56,695	56,890	57,085	57,280	57,475
0,29	55,853	56,041	56,229	56,417	56,606
0,30	55,039	55,221	55,403	55,585	55,769
0,31	54,252	54,428	54,614	54,780	54,956
0,32	53,489	53,660	53,830	54,001	54,172
0,33	52,750	52,916	53,081	53,245	53,412
0,34	52,033	52,194	52,365	52,515	52,676
0,35	51,337	51,493	51,649	51,805	51,961
0,36	50,661	50,812	50,964	51,115	51,267
0,37	50,002	50,150	50,299	50,445	50,592
0,38	49,362	49,489	49,649	49,793	49,936
0,39	48,738	48,878	49,017	49,157	49,297
0,40	48,129	48,266	48,402	48,539	48,675
0,41	47,536	47,669	47,802	47,935	48,068
0,42	46,957	47,086	47,216	47,346	47,476
0,43	46,391	46,518	46,645	46,772	46,899
0,44	45,838	45,962	46,086	46,210	46,334
0,45	45,298	45,419	45,540	45,662	45,783
0,46	44,769	44,888	45,007	45,125	45,244
0,47	44,252	44,368	44,484	44,600	44,716
0,48	43,746	43,859	43,973	44,087	44,200
0,49	43,250	43,361	43,472	43,583	43,695
0,50	42,763	42,873	42,982	43,091	43,200

$\frac{L}{a}$	$C_1, \text{дб}$ при $\frac{a}{w} = 45$				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,05	99,912	101,004	102,096	103,187	104,278
0,06	95,301	96,211	97,121	98,030	98,940
0,07	91,425	92,205	92,984	93,764	94,543
0,08	88,086	88,768	89,450	90,132	90,815
0,09	85,155	85,761	86,368	86,974	87,580

Продолжение табл. 11.15

 $C_1, \text{дБ при } \frac{a}{w} = 45$

$\frac{L}{a}$	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,10	82,544	83,089	83,635	84,181	84,727
0,11	80,190	80,686	81,182	81,678	82,174
0,12	78,047	78,502	78,956	79,411	79,866
0,13	76,080	76,500	76,920	77,340	77,759
0,14	74,263	74,653	75,043	75,433	75,822
0,15	72,574	72,938	73,302	73,666	74,030
0,16	70,997	71,338	71,679	72,020	72,362
0,17	69,517	69,838	70,219	70,480	70,801
0,18	68,124	68,427	68,730	69,033	69,336
0,19	66,806	67,094	67,381	67,668	67,955
0,20	65,558	65,831	66,104	66,376	66,649
0,21	64,371	64,631	64,891	65,151	65,411
0,22	63,230	63,488	63,736	63,984	64,232
0,23	62,160	62,397	62,635	62,872	63,109
0,24	61,126	61,354	61,581	61,809	62,036
0,25	60,135	60,354	60,572	60,790	61,009
0,26	59,184	59,393	59,603	59,768	60,023
0,27	58,268	58,470	58,672	58,874	59,076
0,28	57,386	57,581	57,776	57,970	58,165
0,29	56,535	56,723	56,911	57,099	57,288
0,30	55,713	55,895	56,077	56,259	56,441
0,31	54,918	55,094	55,270	55,446	55,622
0,32	54,148	54,316	54,490	54,660	54,831
0,33	53,403	53,568	53,733	53,899	54,064
0,34	52,679	52,840	53,000	53,161	53,321
0,35	51,977	52,133	52,289	52,445	52,601
0,36	51,294	51,446	51,598	51,749	51,901
0,37	50,631	50,778	50,926	51,073	51,221
0,38	49,984	50,119	50,272	50,415	50,559
0,39	49,355	49,495	49,635	49,775	49,888
0,40	48,742	48,878	49,015	49,151	49,288
0,41	48,144	48,277	48,410	48,543	48,676
0,42	47,560	47,690	47,820	47,950	48,080
0,43	46,990	47,117	47,244	47,371	47,497
0,44	46,433	46,557	46,681	46,805	46,929
0,45	45,888	46,010	46,131	46,252	46,374
0,46	45,356	45,475	45,593	45,712	45,831
0,47	44,835	44,951	45,067	45,183	45,299
0,48	44,325	44,439	44,552	44,676	44,780
0,49	43,825	43,937	44,048	44,159	44,271
0,50	43,336	43,445	43,554	43,663	43,772

Продолжение табл. 11.15

$\frac{L}{a}$	$C_1, \text{дБ при } \frac{a}{w} = 60$				
$\frac{L}{a}$	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,05	101,783	102,874	103,966	105,057	106,149
0,06	96,945	97,856	98,766	99,675	100,585
0,07	92,918	93,698	94,477	95,257	96,037
0,08	89,468	90,151	90,833	91,515	92,196
0,09	86,453	87,059	87,665	88,272	88,878
0,10	83,774	84,320	84,866	85,411	85,957
0,11	81,365	81,861	82,357	82,853	83,349
0,12	79,176	79,630	80,085	80,540	80,995
0,13	77,170	77,589	78,009	78,429	78,849
0,14	75,319	75,708	76,098	76,488	76,878
0,15*	73,600	73,964	74,328	74,691	75,055
0,16	71,996	72,267	72,678	73,019	73,360
0,17	70,493	70,814	71,135	71,456	71,777
0,18	69,078	69,381	69,684	69,987	70,290
0,19	67,741	68,028	68,316	68,603	68,890
0,20	66,475	66,748	67,021	67,293	67,566
0,21	65,272	65,532	65,792	66,052	66,311
0,22	64,126	64,374	64,622	64,870	65,118
0,23	63,032	63,270	63,507	63,744	63,981
0,24	61,986	62,213	62,441	62,668	62,895
0,25	60,983	61,201	61,420	61,638	61,856
0,26	60,020	60,230	60,440	60,650	60,860
0,27	59,094	59,296	59,498	59,700	59,902
0,28	58,202	58,397	58,592	58,787	58,982
0,29	57,342	57,520	57,718	57,906	58,094
0,30	56,511	56,693	56,875	57,057	57,239
0,31	55,708	55,884	56,060	56,236	56,412
0,32	54,920	55,101	55,272	55,442	55,613
0,33	54,177	54,343	54,508	54,673	54,839
0,34	53,447	53,607	53,768	53,928	54,089
0,35	52,738	52,894	53,049	53,205	53,361
0,36	52,049	52,200	52,352	52,503	52,655
0,37	51,379	51,526	51,674	51,821	51,969
0,38	50,727	50,870	51,014	51,157	51,301
0,39	50,092	50,232	50,371	50,511	50,651
0,40	49,473	49,609	49,746	49,882	50,019
0,41	48,869	49,002	49,136	49,269	49,402
0,42	48,281	49,410	48,540	48,670	48,800
0,43	47,706	47,833	47,959	48,086	48,213
0,44	47,144	47,268	47,392	47,516	47,640
0,45	46,595	46,716	46,838	46,959	47,080
0,46	46,058	46,177	46,295	46,414	46,533
0,47	45,533	45,649	45,765	45,881	45,997
0,48	45,019	45,132	45,246	45,360	45,474
0,49	44,515	44,627	44,738	44,849	44,961
0,50	44,022	44,131	44,240	44,349	44,458

Продолжение табл. 11.15

$\frac{L}{a}$	$C_1, \text{дБ при } \frac{a}{w} = 72$				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,05	102,789	103,880	104,972	106,063	107,155
0,06	97,848	98,757	99,667	100,577	101,486
0,07	93,747	94,526	95,306	96,086	96,865
0,08	90,243	90,925	91,607	92,289	92,972
0,09	87,185	87,791	88,398	89,004	89,610
0,10	84,472	85,018	85,564	86,110	86,655
0,11	82,035	82,531	83,029	83,523	84,019
0,12	79,822	80,277	80,731	81,186	81,641
0,13	77,795	78,215	78,635	79,055	79,475
0,14	75,927	76,316	76,706	77,096	77,486
0,15	74,192	74,556	74,920	75,284	75,648
0,16	72,574	72,915	73,257	73,598	73,939
0,17	71,058	71,379	71,700	72,021	72,342
0,18	69,632	69,935	70,238	70,542	70,845
0,19	68,285	68,572	68,860	69,147	69,434
0,20	67,010	67,282	67,555	67,828	68,101
0,21	65,798	66,058	66,318	66,578	66,838
0,22	64,644	64,892	65,140	65,388	65,636
0,23	63,543	63,780	64,017	64,255	64,492
0,24	62,490	62,717	62,944	63,172	63,399
0,25	61,480	61,698	61,917	62,135	62,353
0,26	60,511	60,721	60,931	61,141	61,351
0,27	59,579	59,782	59,984	60,186	60,388
0,28	58,682	58,877	59,072	59,267	59,462
0,29	57,817	58,005	58,193	58,381	58,570
0,30	56,941	57,163	57,345	57,527	57,709
0,31	56,174	56,350	56,526	56,702	56,878
0,32	55,392	55,563	55,737	55,904	56,074
0,33	54,635	54,800	54,965	55,131	55,296
0,34	53,900	54,061	54,221	54,382	54,542
0,35	53,187	53,343	53,499	53,655	53,811
0,36	52,495	52,646	52,798	52,950	53,101
0,37	51,821	51,969	52,116	52,264	52,411
0,38	51,166	51,310	51,453	51,597	51,740
0,39	50,528	50,668	50,808	50,948	51,088
0,40	49,906	50,043	50,179	50,315	50,452
0,41	49,300	49,433	49,566	49,699	49,832
0,42	48,708	48,837	48,968	49,098	49,228
0,43	48,131	48,257	48,384	48,511	48,638
0,44	47,566	47,690	47,814	47,938	48,062
0,45	47,015	47,136	47,257	47,379	47,500
0,46	46,476	46,594	46,713	46,831	46,950
0,47	45,948	46,064	46,180	46,296	46,412
0,48	45,431	45,545	45,659	45,773	45,886
0,49	44,926	45,037	45,148	45,260	45,371
0,50	44,430	44,539	44,649	44,758	44,863

Продолжение табл. 11.15

$\frac{L}{a}$	$C_1, \text{дБ при } \frac{a}{w} = 90$				
	$\frac{t}{a} = 0,012$	$\frac{t}{a} = 0,014$	$\frac{t}{a} = 0,016$	$\frac{t}{a} = 0,018$	$\frac{t}{a} = 0,020$
0,05	103,880	104,971	106,063	107,154	108,246
0,06	98,837	99,747	100,656	101,566	102,476
0,07	94,664	95,444	96,223	97,003	97,782
0,08	91,105	91,788	92,470	93,152	93,834
0,09	88,005	88,611	89,217	89,824	90,430
0,10	85,257	85,803	86,348	86,894	87,440
0,11	82,790	83,286	83,783	84,279	84,775
0,12	80,553	81,007	81,462	81,917	82,372
0,13	78,505	78,925	79,344	79,764	80,184
0,14	76,617	77,007	77,397	77,786	78,176
0,15	74,866	75,230	75,594	75,958	76,321
0,16	73,230	73,575	73,816	74,257	74,598
0,17	71,704	72,025	72,346	72,667	72,988
0,18	70,266	70,569	70,872	71,175	71,479
0,19	68,908	69,195	69,482	69,770	70,057
0,20	67,622	67,895	68,168	68,441	68,714
0,21	66,401	66,661	66,921	67,181	67,441
0,22	65,239	65,487	65,735	65,983	66,231
0,23	64,130	64,367	64,604	64,841	65,079
0,24	63,069	63,296	63,524	63,751	63,978
0,25	62,052	62,271	62,489	62,707	62,926
0,26	61,077	61,287	61,497	61,707	61,916
0,27	60,139	60,341	60,543	60,745	60,947
0,28	59,236	59,431	59,626	59,821	60,015
0,29	58,365	58,563	58,741	58,930	59,118
0,30	57,524	57,706	57,888	58,070	58,252
0,31	56,712	56,888	57,064	57,240	57,416
0,32	55,925	56,096	56,266	56,437	56,608
0,33	55,164	55,329	55,494	55,660	55,825
0,34	54,425	54,585	54,746	54,906	55,067
0,35	53,708	53,864	54,020	54,176	54,332
0,36	53,011	53,163	53,315	53,466	53,618
0,37	52,334	52,482	52,629	52,777	52,924
0,38	51,675	51,819	51,963	52,106	52,250
0,39	51,034	51,174	51,314	51,454	51,593
0,40	50,409	50,544	50,681	50,814	50,954
0,41	49,799	49,932	50,065	50,198	50,331
0,42	49,204	49,334	49,464	49,594	49,724
0,43	48,624	48,751	48,878	49,004	49,131
0,44	48,057	48,181	48,305	48,429	48,554
0,45	47,502	47,624	47,745	47,866	47,988
0,46	46,960	47,079	47,198	47,316	47,435
0,47	46,430	46,546	46,662	46,779	46,895
0,48	45,911	46,025	46,139	46,252	46,366
0,49	45,403	45,514	45,626	45,737	45,849
0,50	44,905	45,014	45,124	45,233	45,342

КРЕСТООБРАЗНОЕ ОТВЕРСТИЕ СВЯЗИ В ОБЩЕЙ ШИРОКОЙ СТЕНКЕ ДВУХ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДОВ (рис. 11.21)

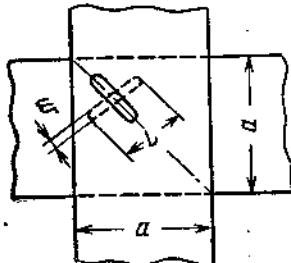


Рис. 11.21. Крестообразное отверстие связи в общей широкой стенке двух перпендикулярных волноводов.

Переходное затухание

$$C = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{24 a^2 b \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)} \quad (11.76)$$

может быть представлено в виде (11.50), если обозначить

$$C_1 = -20 \lg \frac{\pi^2 L^3 F_m}{48 a^3 \left(\ln \frac{4L}{w} - 1 \right)}; \quad (11.77)$$

$$C_2 = 20 \lg \frac{2a}{b}. \quad (11.78)$$

Значение главной части переходного затухания (C_1) в зависимости от L/a ; t/a и a/w даны в табл. 11.15.

Пример. Переходное затухание круглого отверстия, расположенного в общей широкой стенке параллельных волноводов, должно быть равно $C = 30 \text{ дБ}$. Известно, что $x = x_0$, $a = 72 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$, $\Lambda = 138,9 \text{ мм}$, $t = 1 \text{ мм}$. Найти диаметр отверстия.

Координата центра отверстия определяется по формуле (11.57). При этом, в первом приближении принимаем

$$\frac{F_m}{F_e} \approx 1, \text{ тогда } x_0 = \frac{a}{\pi} \arctan \frac{10}{7,2 \sqrt{2}} = 0,247 a.$$

Отсюда по формуле (11.60)

$$C_2 = 20 \lg \frac{72^2}{138,9 \cdot 10} \sin^2 0,247 \pi = 5,43 \text{ дБ},$$

и, следовательно,

$$C_1 = C + C_2 = 30 + 5,43 = 35,43 \text{ дБ}.$$

По табл. 11.14 находим, что при $t/a = 0,014$; $d/a = 0,271$; $d = 19,51 \text{ мм}$.

Если необходимо рассчитать диаметр более точно, то определяют x_0 и C_2 для найденного в первом приближении диаметра. Тогда $x_0 = 0,253 a$; $C_2 = 5,62 \text{ дБ}$; $C_1 = 35,62 \text{ дБ}$; $d/a = 0,27$; $d = 19,44 \text{ мм}$.

Таблица 11.16

Тип связи	Полоса, %		
	переходное затухание по уровню	направленность по уровню	0,2 дБ
			0,5 дБ
	±10%	±17%	0
	±10%	±17%	0
Связь двух параллельных волноводов в общей широкой стенке	±1%	±3%	0
	±10%	±3%	0
	±10%	±17%	±5%
Связь перпендикулярных волноводов в широкой стенке	±20%	±20%	±20%
	±1%	±3%	0

Продолжение табл. 11.16

Тип связи	Полоса, %			
	переходное затухание по уровню	направленность по уровню		
	0,2 дБ	0,5 дБ	20 дБ	
Связь параллельных волноводов в узкой стенке		±1%	±3%	0
Связь параллельных волноводов в общей широкой и узкой стенах		±1%	±3%	0
		±20%	±20%	0

В табл. 11.16 даны сводные численные данные по переходному затуханию и направленности элементов связи различных типов.

11.11. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА МОСТАХ И ФИЛЬТРАХ

Устройства сложения частотных каналов (сумматоры) обеспечивают независимую работу нескольких передатчиков с разнесенными полосами частот на общую нагрузку; устройства разделения частотных каналов обеспечивают независимую работу нескольких приемников с разнесенными полосами от одной антенны. Эти уст-

ройства выполняются в виде тройниковых или балансных систем с применением фильтров [16].

Система тройникового типа (рис. 11.22) состоит из тройника, в два плеча которого включены фильтры. Каждый фильтр пропускает только полосу частот соединенного с ним передатчика (или приемника), при этом полоса частот другого передатчика находится в полосе заграждения фильтра. Соединение нескольких таких тройников (рис. 11.23) позволяет вести одновременно работу нескольких передатчиков (или приемников) на од-

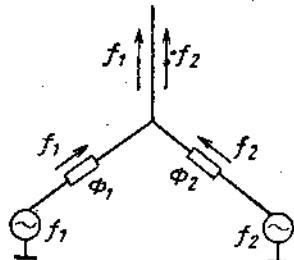


Рис. 11.22. Сумматор тройникового типа.

ну антенну. Система тройникового типа имеет следующие недостатки: в полосе частот каждого частотного канала возможно резкое увеличение потерь из-за влияния второго передатчика. Для устранения этого явления необходимо значительно увеличить ра-

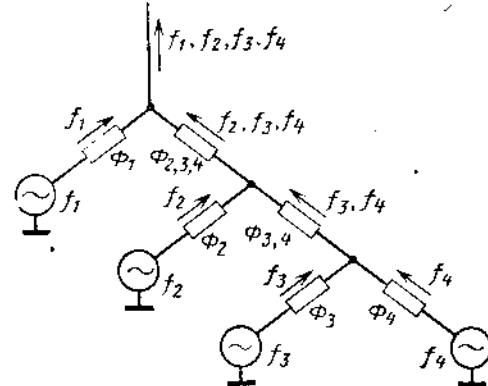


Рис. 11.23. Соединение нескольких тройниковых сумматоров.

бочее затухание фильтра в полосе заграждения или установить между передатчиком и фильтром вентиль. В устройстве тройникового типа фильтры должны быть настроены на разные частоты, иначе говоря, для устройства данного типа необходимы два различных фильтра.

Балансные системы состоят из мостов и фильтров. Ниже рассмотрены балансные системы с применением двойных Т-мостов, со-

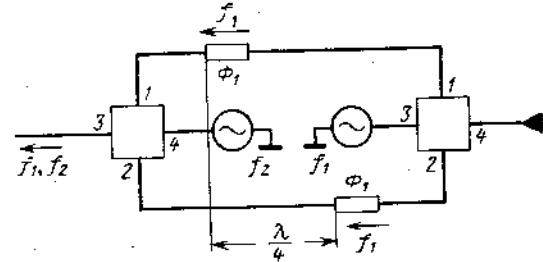


Рис. 11.24. Балансный сумматор на двойных Т-мостах и ППФ.

направленных или противонаправленных мостов. Направленные фильтры рассмотрены отдельно в § 11.12.

Балансная система на двойных Т-мостах (рис. 11.24) состоит из двух мостов и двух одинаковых фильтров, расположенных между ними.

Фильтры смешены друг относительно друга на четверть длины волны и пропускают полосу частот одного из передатчиков (приемников).

Волноводный двойной Т-мост (рис. 11.25) состоит из тройника, расположенного в плоскости электрических силовых линий, образованного боковыми плечами и Е-плечом, и тройника, расположенного в плоскости магнитных силовых линий, образованного теми же боковыми плечами и Н-плечом.

Вследствие симметрии системы мощность, поступающая в тройник через Н-плечо, делится поровну между 1 и 2 плечами и не проходит в Е-плечо (при условии, что все плечи соединены с согласованными нагрузками); мощность, поступающая в тройник через Е-плечо, делится поровну между плечами 1 и 2, не попадая в Н-плечо,

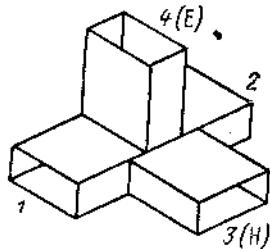


Рис. 11.25. Эскиз волноводного двойного Т-моста.

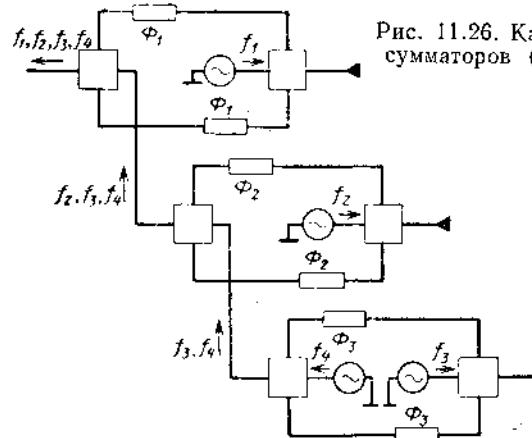


Рис. 11.26. Каскадное включение сумматоров (рис. 11.24) с ППФ.

причем волны в боковых плечах находятся в противофазе [17]. На основании принципа обратимости следует, что две одинаковые синфазные волны, поданные из боковых плеч, сложатся и пройдут в Н-плечо, две одинаковые противофазные волны из боковых плеч пройдут в Е-плечо; в этих случаях соответственно Е- и Н-плечи остаются связанными.

Устройства на двойных Т-мостах выполняются в двух вариантах: с полосно-пропускающими фильтрами (ППФ) или с полосно-заграссаждающими фильтрами (ПЗФ). Для работы нескольких передатчиков (приемников) устройство с ППФ, изображенное на рис. 11.24, включается каскадно, как показано на рис. 11.26. Система с ПЗФ показана на рис. 11.27.

Балансные системы могут быть построены также с помощью мостов других типов: квадратных, щелевых, па связанных полосковых линиях и т. д.

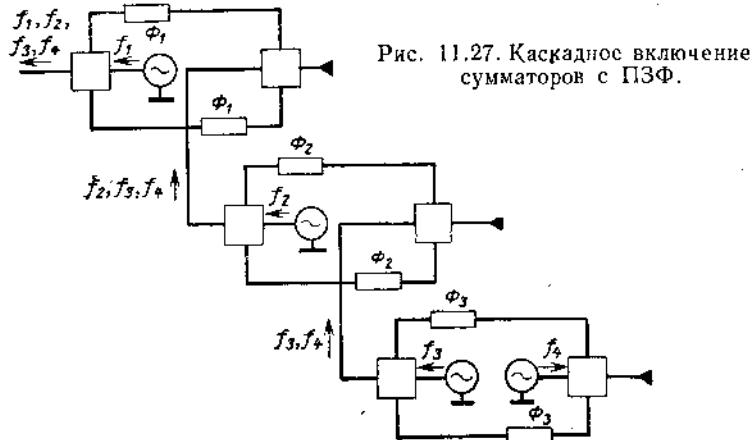


Рис. 11.27. Каскадное включение сумматоров с ПЗФ.

На рис. 11.28 показано устройство балансного типа, состоящее из двух сонаправленных мостов¹ и двух одинаковых фильтров, расположенных между ними. (В случае противонааправленных мостов расположение фильтров меняется в соответствии с изменением положения выходных плеч мостов.)

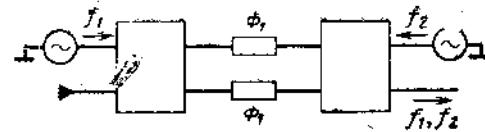


Рис. 11.28. Балансный сумматор на сонаправленных мостах.

В таких устройствах необходимые фазовые сдвиги ($\pi/2$) создаются за счет свойств мостов. Так же, как и в вышеописанной балансной системе на двойных Т-мостах, здесь могут быть использованы ППФ и ПЗФ.

¹ Определения сонаправленных и противонааправленных в. симполюсников даны в гл. 2.

В связи с этим цепочка устройств, обеспечивающих работу нескольких передатчиков (приемников), образуется различными способами: на рис. 11.29 представлено устройство с полосно-пропускающими фильтрами; на рис. 11.30 — устройство с полосно-загряздающими фильтрами.

Основными параметрами таких устройств являются потери мощности каждого передатчика (приемника), т. е. потери в определенном частотном канале, КБВ в каждом частотном канале и развязка между передатчиками (приемниками). Эти параметры зависят от реальных свойств используемых мостов и фильтров. Рабочее затухание фильтров в полосе пропускания или в полосе заграждения

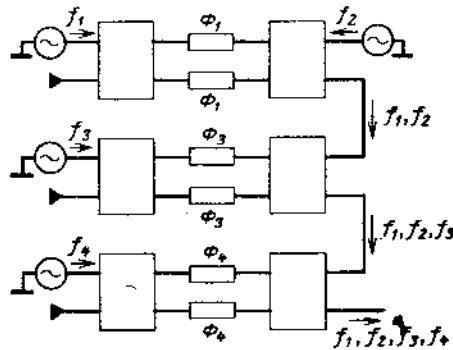


Рис. 11.29. Каскадное включение сумматоров (рис. 11.28) с ППФ.

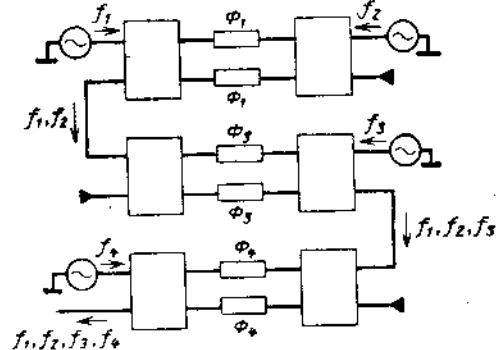


Рис. 11.30. Каскадное включение сумматоров (рис. 11.28) с ПЗФ.

определяет потери в каждом частотном канале: чем больше оно в полосе пропускания или меньше в полосе заграждения, тем больше потери в соответствующем частотном канале. Развязка между передатчиками (приемниками) определяется неточностью деления

мощности в мостах и неидентичностью характеристик двух фильтров. КБВ в частотных каналах зависит от неточности деления мощности в мостах и от неидеальности характеристик фильтров.

В устройствах для нескольких передатчиков (приемников) параметры частотного канала зависят от свойств мостов и фильтров, через которые проходит мощность данного передатчика,

11.12. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ИЗ НАПРАВЛЕННЫХ ФИЛЬТРОВ

При построении многоканальных систем СВЧ можно использовать направленные фильтры, в которых сочетаются свойства полосового фильтра и направленного ответвителя. Они обладают постоянством входного сопротивления на входе в широком диапазоне частот. При сопряжении в многоканальную систему направленные фильтры обеспечивают высокую развязку между каналами и малые вносимые потери.

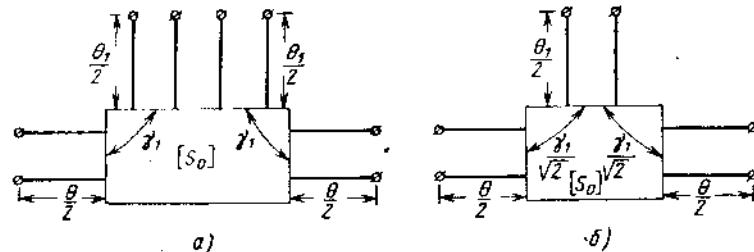


Рис. 11.31. Сочленения линий передач:
а—восьмиполюсное; б—шестиполюсное.

Схемы направленных фильтров могут быть построены на основе восьмиполюсных (рис. 11.31, а) и шестиполюсных (рис. 11.31, б) сочленений линий передач. На этих рисунках: $\theta/2$ и $\theta_1/2$ — электрические длины отрезков линий, примыкающих к сочленениям; γ_1 (рис. 11.31, а) и $\gamma_1/\sqrt{2}$ (рис. 11.31, б) — модули коэффициентов пропускания матрицы рассеяния $[S_0]$ сочленений, связанные с переходными ослаблениями «С» соотношениями $C = 10 \lg \frac{1}{\gamma_1^2}$, для восьмиполюсников и $C = 10 \lg \frac{2}{\gamma_1^2}$ для шестиполюсников.

Схемы направленных фильтров образуются взаимным соединением таких сочленений и могут быть разделены на две группы (рис. 11.32, а и б). На этих рисунках четырехполюсники с матрицами передачи $[T]$ представляют собой дополнительные устройства частотной селекции (в многоконтурных схемах), причем

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ -T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}. \quad (11.79)$$

Отметим, что дополнительные устройства частотной селекции в некоторых фильтрах первой группы могут быть реализованы и с помощью восьмиполосников (направленных ответвителей).

Для симметричных схем направленных фильтров исходные сочленения являются одинаковыми, за исключением одного в фильтрах второй группы. На рис. 11.32, б матрица этого шестиполосника обозначена $[S_0]$, что указывает на изменение фазы его коэффициента пропускания на π по сравнению с аналогичными фазами других шестиполосников. Указанное отличие достигается соответствующим выбором элементов связи или подключением к данному шестиполоснику отрезков линий с электрической длиной π (на резонансной частоте). Некоторые схемы, реализующие направленные фильтры первой группы, показаны на рис. 11.33, а — д, а второй — на рис. 11.34, а — г.

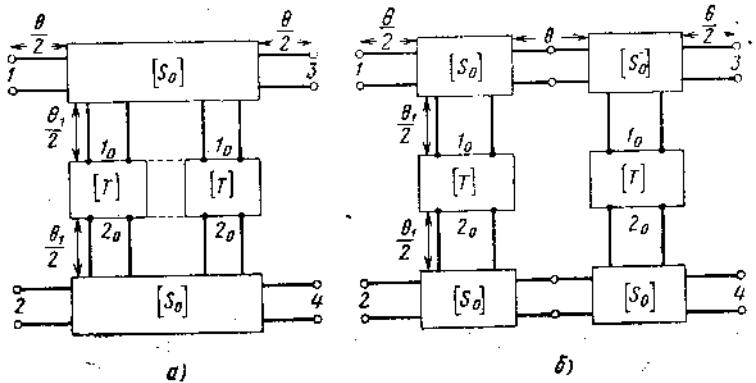


Рис. 11.32. Обобщенные схемы направленных фильтров:
а — из восьмиполосников; б — из шестиполосников.

На рис. 11.33, а и б изображены фильтры, в которых в качестве исходных элементов и дополнительных устройств частотной селекции используются направленные ответвители соответственно с соединением в средоточенной и распределенной связью. На рис. 11.33, в изображен фильтр, в котором в качестве исходных восьмиполосников используются двойные Т-образные сочленения, а дополнительные устройства частотной селекции состоят из диафрагм с примыкающими к ним отрезками волноводов. Частным, вырожденным случаем фильтров, построенных на основе двойных Т-образных сочленений, являются фильтры с вращающейся поляризацией поля (рис. 11.33, г и д).

На рис. 11.34, а и б изображены волноводные фильтры второй группы. Противофазность коэффициента пропускания одного из шестиполосников достигается соответствующей ориентацией его щели связи относительно основного волновода.

На рис. 11.34, в и г изображены фильтры второй группы на полосковых линиях. Дополнительное устройство частотной селек-

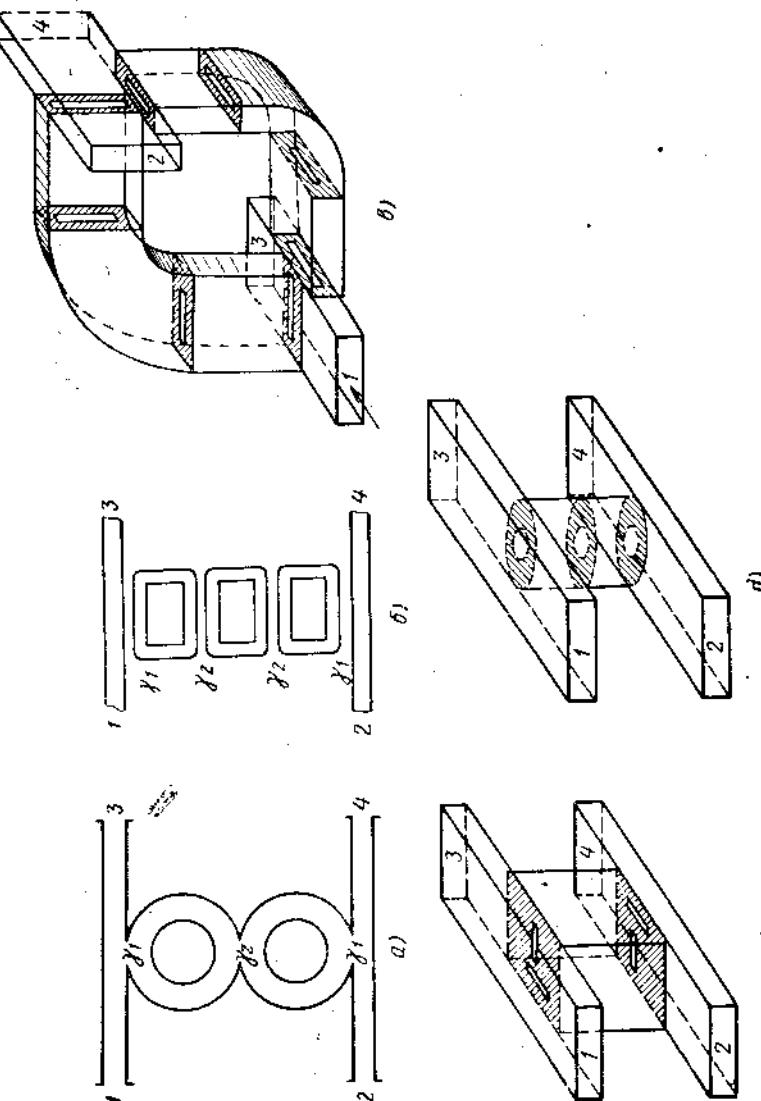


Рис. 11.33. Схемы направленных фильтров из восьмиполосных сочленений:
а — волноводных направленных ответвителей; б — полосковых направленных ответвителей; в — вырожденного двойного Т-со-
члененного волновода; г — вращающейся поляризацией поля.

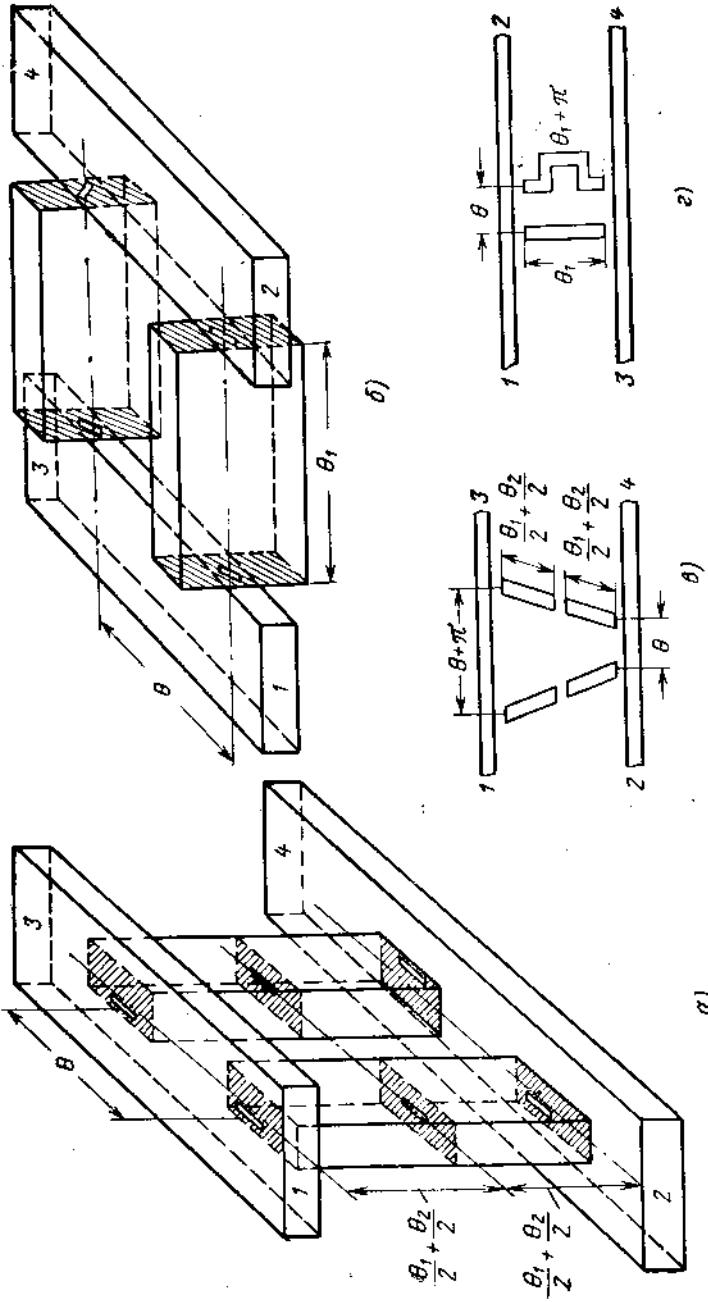


Рис. 11.34. Схемы направленных фильтров из шестиполосных сочленений:
— волноводные со связью по широкой стенке; б— волноводных с разной длиной
соединительных линий; в— полосковых с разной длиной резонаторов.

ции в фильтре (рис. 11.34, в) осуществляется с помощью зазора в отрезке полосковой линии.

Матрица рассеяния первой группы направленных фильтров имеет вид

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & p & q \\ q & p & 0 & 0 \\ p & q & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11.80)$$

Здесь q — коэффициент пропускания в прямом направлении ($q = S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42}$);

p — коэффициент пропускания через цепь направленной связи ($p = S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32}$).

В силу унитарности матрицы рассеяния между модулями этих коэффициентов существует следующая связь:

$$|q|^2 + |p|^2 = 1. \quad (11.81)$$

Модуль коэффициента $|p|$ равен

$$|p| = \frac{\gamma_1^2}{|T_{11} - 2T_{12}\beta_1 e^{-j\psi_1} - T_{22}\beta_1^2 e^{-j2\psi_1}|}; \quad (11.82)$$

здесь и далее

$$\beta_1 = \sqrt{1 - \gamma_1^2}; \quad (11.83)$$

$$\psi_1 = \theta_1 + \varphi_1, \quad (11.84)$$

причем φ_1 — фазовый сдвиг, вносимый элементом связи в резонатор. С точностью до коэффициента отражения в прямом направлении шестиполосного сочленения и при условиях, что расстояние между сочленениями по оси основной линии θ равно $\pi/2$, формулы (11.80 — 11.84) сохраняются и для фильтров второй группы.

Как было видно из рис. 11.33 и 11.34, дополнительные устройства частотной селекции представляют собой каскадное соединение элементарных восемиполосников или четырехполюсников.

Определение матриц передачи $[T]$ дополнительных устройств частотной селекции производится на основе известной теории схем. Например, матрица передачи i -й диафрагмы в волноводе с примыкающими к ней отрезками волноводов может быть представлена в виде

$$[T_i] = \frac{1}{j\beta_i} \begin{bmatrix} e^{j\beta_i} & \beta_i \\ -\beta_i & -e^{-j\beta_i} \end{bmatrix}, \quad (11.85)$$

причем

$$\beta_i = \theta_i + \varphi_i; \quad (11.86)$$

$$\gamma_i = \sin \varphi_i; \quad (11.87)$$

$$\beta_i = \cos \varphi_i; \quad (11.88)$$

здесь θ_i — электрическая длина примыкающей к диафрагме передающей линии;

φ_i — мера модулей и фаз коэффициентов матрицы передачи одной только диафрагмы.

Каскадное соединение таких диафрагм, образующее дополнительное многоконтурное устройство частотной селекции, показано на рис. 11.35. Направленный фильтр может не содержать ни одной дополнительной диафрагмы (одноконтурный фильтр), может содержать одну дополнительную диафрагму (двухконтурный фильтр), две и т. д. диафрагмы.

Аналогично (11.85) может быть записана и матрица передачи зазора в полосковой линии.

Для фильтров, построенных на основе направленных ответвителей (рис. 11.33 а, б) под величинами φ_i , γ_i и β_i следует понимать параметры ответвителя (φ_i — фазовый сдвиг в цепи направленной связи; γ_i и β_i — коэффициенты пропускания в цепи направленной связи и в прямом направлении соответственно).

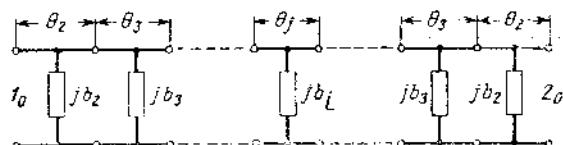


Рис. 11.35. Схема каскадного соединения диафрагм.

Таким образом, все направленные фильтры характеризуются обобщенными параметрами ψ_i , γ_i и $\beta_i = \sqrt{1 - \gamma_i^2}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$).

Коэффициент ρ многоконтурных фильтров весьма сложно зависит от этих параметров контуров. Можно положить эквивалентные электрические длины всех резонаторов одинаковыми, т. е.

$$\psi_1 = \psi_2 = \dots = \psi_n = \psi.$$

При этом в соответствии с формулой (11.86) θ_i могут быть различными, в зависимости от выбора φ_i . В этом случае вносимые через цепь направленной связи потери

$$L = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вых}}} = \frac{1}{|\rho|^2} \quad (11.89)$$

определяются квадратом некоторого полинома $Q_n(\sin \psi)$ степени n (где n — число контуров фильтра):

$$L = 1 + Q_n^2(\sin \psi). \quad (11.90)$$

Параметрами полинома являются величины $\gamma_i = \sqrt{1 - \beta_i^2}$.

В многоконтурных фильтрах соответствующим выбором коэффициентов пропускания можно получить полиномиальные частотные

характеристики различного вида; средняя частота полосы пропускания фильтра определяется из условия

$$\psi_0 = l\pi; \quad (11.91)$$

где $l = 1, 2, 3, \dots$

Индекс «0» означает, что данное условие выполняется на средней частоте фильтра. Аппроксимирующие полиномы записываем в следующем виде:

— для фильтров с максимальной плоской характеристикой

$$Q_n(\sin \psi) = h \left(\frac{\sin \psi}{\sin \psi_{\max}} \right)^n; \quad (11.92)$$

— для фильтров с чебышевской характеристикой

$$Q_n(\sin \psi) = h T_n \left(\frac{\sin \psi}{\sin \psi_{\max}} \right). \quad (11.93)$$

Здесь: ψ_{\max} — значение угла ψ , соответствующего краю полосы пропускания фильтра;

h — амплитудный множитель;

T_n — полином Чебышева 1-го рода n -го порядка.

Будем полагать в диапазоне частот

$$\psi = \psi_0 + \Delta\psi = l\pi + \Delta\psi, \quad \psi_{\max} = l\pi + \Delta\psi_{\max}. \quad (11.94)$$

Тогда аппроксимирующие функции (11.92) и (11.93) можно записать в виде

$$Q_n(\sin \Delta\psi) = h \left(\frac{\sin \Delta\psi}{\sin \Delta\psi_{\max}} \right)^n; \quad (11.95)$$

$$Q_n(\sin \Delta\psi) = h T_n \left(\frac{\sin \Delta\psi}{\sin \Delta\psi_{\max}} \right). \quad (11.96)$$

В результате аппроксимации получаем системы уравнений (см. табл. 11.17 и 11.18) для определения параметров β_i по заданной частотной характеристике (h и $\Delta\psi_{\max}$). В результате численного решения приведенных в табл. 11.17 и 11.18 уравнений рассчитаны табл. 11.19 — 11.26 для определения требуемых коэффициентов пропускания $\gamma_i = \sqrt{1 - \beta_i^2}$ по заданной частотной характеристике. Эти таблицы составлены для фильтров с полуволновыми резонаторами ($\psi_0 = \pi$) и $b_n = 10 \lg (1 + h^2)$ равными 1 и 3 дБ.

Для практических расчетов можно полагать

$$\Delta\psi_{\max} = \frac{1}{2} \xi \tau_{\text{п}}, \quad (11.97)$$

где $\tau_{\text{п}}$ — относительная полоса пропускания фильтра; ξ — коэффициент частотной избирательности, равный

$$\xi = \psi_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2. \quad (11.98)$$

Таблица II.17

Уравнения для расчета направленных фильтров с максимально плоской характеристикой

Число контуров	Уравнения
1	$\sin \Delta\psi_{\max} = h \frac{1 - \beta_1^2}{2\beta_1}$
2	$\sin \Delta\psi_{\max} = \frac{1 - \beta_1^2}{2} \sqrt{\frac{h}{\beta_1(1 + \beta_1^2)}},$ $\beta_2 = \frac{2\beta_1}{1 + \beta_1^2}.$
3	$\sin^3 \Delta\psi_{\max} = h \frac{(1 - \beta_1^2) \left\{ 1 - \left[\sqrt{\left(\frac{1 + \beta_1^2}{2\beta_1} \right)^2 + 3} - \frac{1 + \beta_1^2}{2\beta_1} \right]^2 \right\}}{8\beta_1},$ $\beta_2 = \sqrt{3 + \left(\frac{1 + \beta_1^2}{2\beta_1} \right)^2 - \frac{1 + \beta_1^2}{2\beta_1}}.$
4	$\sin^4 \Delta\psi_{\max} = h \frac{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2) \sqrt{1 - \beta_3^2}}{16\beta_1},$ $(1 - \beta_1^2)\beta_2^3 + 4\beta_1(1 + \beta_1^2)\beta_2^2 - (1 + 14\beta_1^2 + \beta_1^4)\beta_2 +$ $+ 4\beta_1(1 + \beta_1^2) = 0,$ $\beta_3 = \frac{2 \frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2}}{1 + \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2} \right)^2}.$
5	$\sin^5 \Delta\psi_{\max} = h \frac{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2)(1 - \beta_3^2)}{32\beta_1},$ $\beta_1^3\beta_3^6 - \beta_1^2(1 + \beta_1^2)\beta_3^5 - [13\beta_1^3 + \beta_1(1 + \beta_1^2)^2]\beta_3^4 +$ $+ 2\beta_1^2(1 + \beta_1^2)\beta_3^3 + [9\beta_1(1 + \beta_1^2)^2 - 5\beta_3^2]\beta_3^2 + [(1 + \beta_1^2)^3 -$ $- 5\beta_1^2(1 + \beta_1^2)]\beta_3 + [25\beta_1^3 - 10\beta_1(1 + \beta_1^2)^2] = 0;$ $\beta_3 = \frac{\beta_1(5 - \beta_3^2)}{1 + 2\beta_1\beta_3 + \beta_1^2}.$

Таблица II.18

Уравнения для расчета направленных фильтров с чебышевской характеристикой

Число контуров	Уравнения
1	$\sin \Delta\psi_{\max} = h \frac{1 - \beta_1^2}{2\beta_1}.$
2	$\cos \Delta\psi_{\max} = \sqrt{\frac{\beta_2(1 + \beta_1^2)}{2\beta_1}},$ $\beta_1 = \frac{1 - \sqrt{(1 - \beta_2^2)(1 + h^2)}}{\beta_2 - h\sqrt{1 - \beta_2^2}}.$
3	$\cos^2 \Delta\psi_{\max} = \frac{\sqrt{1 - \frac{2\beta_1^3 \sin^3 \Delta\psi_{\max}}{h(1 - \beta_1^2)}(1 + \beta_1^2)} + \beta_1 \left[1 - \frac{2\beta_1 \sin^3 \Delta\psi_{\max}}{h(1 - \beta_1^2)} \right]}{3\beta_1},$ $\beta_2 = \sqrt{1 - \frac{2\beta_1 \sin^3 \Delta\psi_{\max}}{h(1 - \beta_1^2)}}.$
4	$\sin^4 \Delta\psi_{\max} = h \frac{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2) \sqrt{1 - \beta_3^2}}{2\beta_1},$ $\sin^2 \Delta\psi_{\max} = 1 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1^2) + 2\beta_1\beta_2\beta_3}{4\beta_1},$ $h = \frac{2(1 - \beta_1\beta_2)(\beta_1 - \beta_2) + \beta_3[(1 - \beta_1\beta_2)^2 + (\beta_1 - \beta_2)^2]}{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2)\sqrt{1 - \beta_3^2}}.$
5	$\sin^5 \Delta\psi_{\max} = h \frac{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2)(1 - \beta_3^2)}{2\beta_1},$ $\sin^2 \Delta\psi_{\max} = 1 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1^2) + 2\beta_1\beta_2\beta_3 + \beta_1\beta_3^2}{5\beta_1},$ $\sin \Delta\psi_{\max} = \frac{5}{2}h \frac{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2)}{8\beta_1 + \beta_3[(1 - \beta_1\beta_2)^2 + (1 - \beta_3^2)]} +$ $+ (\beta_1 - \beta_2)^2 + \beta_2(\beta_3^2 - 3)(1 + \beta_1^2) + \beta_1(\beta_2^2 - 3)(1 + \beta_3^2).$

Таблица 11.19

Двухконтурный направленный фильтр с максимально плоской характеристикой

$\Delta \Psi_{\text{макс}}$				$\Delta \Psi_{\text{макс}}$			
$b_{\Pi} = 1 \text{ дБ}$	$b_{\Pi} = 3 \text{ дБ}$	γ_1	γ_2	$b_{\Pi} = 1 \text{ дБ}$	$b_{\Pi} = 3 \text{ дБ}$	γ_1	γ_2
0,006	0,007	0,140	0,010	0,150	0,212	0,670	0,298
0,010	0,014	0,200	0,020	0,158	0,222	0,683	0,308
0,015	0,021	0,245	0,025	0,164	0,232	0,694	0,320
0,021	0,029	0,280	0,041	0,171	0,242	0,704	0,335
0,026	0,036	0,313	0,051	0,178	0,252	0,714	0,346
0,031	0,048	0,340	0,062	0,186	0,262	0,724	0,360
0,037	0,051	0,362	0,072	0,193	0,273	0,735	0,374
0,042	0,059	0,392	0,080	0,201	0,283	0,742	0,387
0,048	0,066	0,415	0,094	0,209	0,293	0,751	0,400
0,053	0,074	0,436	0,107	0,216	0,305	0,760	0,415
0,059	0,082	0,456	0,116	0,223	0,325	0,765	0,425
0,065	0,090	0,475	0,127	0,231	0,330	0,774	0,435
0,070	0,098	0,493	1,139	0,240	0,340	0,785	0,447
0,076	0,106	0,502	0,148	0,248	0,350	0,792	0,458
0,082	0,115	0,527	0,161	0,255	0,362	0,800	0,470
0,088	0,123	0,542	0,173	0,264	0,375	0,807	0,485
0,094	0,131	0,560	0,185	0,272	0,385	0,815	0,500
0,100	0,139	0,570	0,197	0,281	0,399	0,822	0,510
0,106	0,148	0,585	0,209	0,289	0,410	0,828	0,520
0,112	0,157	0,600	0,220	0,299	0,425	0,835	0,536
0,118	0,167	0,613	0,233	0,307	0,436	0,840	0,546
0,125	0,175	0,623	0,244	0,316	0,450	0,848	0,565
0,131	0,184	0,638	0,258	0,326	0,465	0,854	0,570
0,138	0,193	0,648	0,270	0,335	0,480	0,860	0,590
0,144	0,204	0,662	0,283	0,345	0,494	0,866	0,600

Таблица 11.20

Трехконтурный направленный фильтр с максимально плоской характеристикой

$\Delta \Psi_{\text{макс}}$	$b_{\Pi} = 1 \text{ дБ}$		$b_{\Pi} = 3 \text{ дБ}$	
	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2
0,02	0,312	0,045	0,283	0,045
0,04	0,434	0,077	0,387	0,063
0,06	0,510	0,109	0,463	0,089
0,08	0,574	0,141	0,522	0,109
0,10	0,613	0,179	0,575	0,141
0,12	0,672	0,205	0,616	0,167
0,14	0,710	0,244	0,655	0,195
0,16	0,743	0,279	0,686	0,224
0,18	0,770	0,311	0,716	0,255
0,20	0,796	0,320	0,741	0,279
0,22	0,816	0,374	0,765	0,300
0,24	0,835	0,410	0,785	0,332
0,26	0,852	0,438	0,804	0,357
0,28	0,869	0,469	0,820	0,378
0,30	0,881	0,499	0,835	0,409
0,32	0,894	0,524	0,849	0,427
0,34	0,904	0,551	0,861	0,452
0,36	0,913	0,578	0,873	0,475
0,38	0,920	0,604	0,883	0,498
0,40	0,930	0,628	0,892	0,519
0,42	0,935	0,653	0,899	0,541
0,44	0,943	0,675	0,910	0,562
0,46	0,947	0,698	0,915	0,581
0,48	0,952	0,717	0,921	0,602
0,50	0,957	0,739	0,927	0,621

Таблица 11.21

Четырехконтурный направленный фильтр с максимально плоской характеристикой

$\Delta \Psi_{\max}$		T_1	T_2	T_3
$b_{II} = 1 \text{ } \delta\text{б}$	$b_{II} = 3 \text{ } \delta\text{б}$			
0,034	0,041	0,436	0,068	0,046
0,042	0,049	0,475	0,076	0,052
0,049	0,058	0,504	0,089	0,063
0,056	0,066	0,542	0,110	0,077
0,064	0,076	0,570	0,126	0,089
0,072	0,085	0,600	0,141	0,100
0,080	0,096	0,638	0,161	0,111
0,089	0,104	0,645	0,179	0,118
0,097	0,118	0,670	0,195	0,126
0,106	0,126	0,694	0,210	0,141
0,113	0,136	0,714	0,226	0,148
0,124	0,147	0,730	0,245	0,162
0,134	0,159	0,751	0,265	0,173
0,144	0,170	0,768	0,279	0,190
0,154	0,182	0,785	0,283	0,200
0,165	0,195	0,800	0,321	0,213
0,176	0,208	0,815	0,339	0,238
0,187	0,221	0,828	0,360	0,245
0,199	0,236	0,840	0,379	0,260
0,210	0,251	0,854	0,400	0,274
0,227	0,267	0,866	0,424	0,284
0,255	0,311	0,893	0,479	0,333
0,298	0,364	0,915	0,539	0,378
0,340	0,402	0,935	0,602	0,440
0,393	0,471	0,950	0,674	0,503
0,457	0,546	0,965	0,740	0,575
0,529	0,640	0,980	0,803	0,660
0,628	0,784	0,989	0,869	0,759
0,772	0,977	0,995	0,933	0,796

Таблица 11.22

Пятиконтурный направленный фильтр с максимально плоской характеристикой

$\Delta \Psi_{\max}$		T_1	T_2	T_3
$b_{II} = 1 \text{ } \delta\text{б}$	$b_{II} = 3 \text{ } \delta\text{б}$			
0,242	0,277	0,916	0,310	0,242
0,249	0,285	0,920	0,315	0,249
0,256	0,294	0,924	0,532	0,326
0,263	0,302	0,928	0,542	0,336
0,270	0,310	0,932	0,555	0,344
0,277	0,319	0,936	0,568	0,352
0,285	0,328	0,939	0,580	0,364
0,293	0,337	0,942	0,592	0,373
0,302	0,347	0,946	0,605	0,383
0,310	0,357	0,949	0,618	0,394
0,319	0,367	0,952	0,631	0,407
0,328	0,378	0,955	0,645	0,417
0,337	0,389	0,958	0,657	0,428
0,347	0,400	0,961	0,670	0,441
0,357	0,411	0,963	0,683	0,451
0,368	0,424	0,966	0,694	0,466
0,379	0,437	0,969	0,711	0,481
0,390	0,450	0,971	0,724	0,493
0,402	0,464	0,973	0,738	0,508
0,415	0,479	0,976	0,752	0,523
0,428	0,495	0,978	0,766	0,540
0,442	0,511	0,980	0,779	0,555
0,456	0,528	0,982	0,793	0,572
0,472	0,547	0,984	0,809	0,589
0,488	0,566	0,985	0,821	0,607
0,505	0,587	0,987	0,834	0,627
0,524	0,609	0,988	0,844	0,645
0,544	0,633	0,990	0,860	0,670
0,565	0,660	0,991	0,875	0,686
0,589	0,689	0,993	0,894	0,715
0,614	0,720	0,994	0,903	0,740
0,643	0,756	0,995	0,915	0,755
0,674	0,795	0,996	0,931	0,791
0,710	0,841	0,997	0,942	0,817
0,751	0,895	0,997	0,953	0,851
0,799	0,961	0,998	0,964	0,885
0,858	1,05	0,999	0,973	0,911
0,933	1,16	0,999	0,982	0,936

Таблица 11.23

Двухконтурный направленный фильтр с чебышевской характеристикой

$b_n = 1 \text{ дБ}$	$b_n = 3 \text{ дБ}$			γ_2
$\Delta\phi_{\max}$	γ_1	$\Delta\phi_{\max}$	γ_1	
0,025	0,232	0,029	0,182	0,045
0,079	0,400	0,091	0,332	0,141
0,111	0,475	0,129	0,392	0,200
0,137	0,516	0,158	0,430	0,245
0,158	0,546	0,182	0,459	0,280
0,177	0,572	0,204	0,484	0,313
0,194	0,595	0,223	0,504	0,346
0,209	0,613	0,243	0,522	0,367
0,224	0,630	0,262	0,536	0,392
0,238	0,646	0,278	0,550	0,415
0,255	0,659	0,294	0,564	0,436
0,263	0,672	0,306	0,574	0,456
0,279	0,683	0,313	0,586	0,475
0,289	0,694	0,338	0,596	0,493
0,303	0,704	0,353	0,605	0,509
0,314	0,713	0,363	0,615	0,527
0,324	0,723	0,375	0,624	0,542
0,338	0,731	0,388	0,630	0,563
0,346	0,739	0,401	0,640	0,570
0,358	0,746	0,410	0,650	0,585
0,366	0,753	0,425	0,653	0,600
0,378	0,760	0,435	0,660	0,613
0,386	0,766	0,446	0,667	0,626
0,400	0,771	0,457	0,672	0,638
0,405	0,777	0,468	0,678	0,645
0,416	0,784	0,477	0,683	0,662
0,426	0,789	0,490	0,690	0,670
0,435	0,795	0,500	0,695	0,683
0,444	0,799	0,510	0,700	0,694
0,453	0,804	0,520	0,705	0,704

Таблица 11.24

Трехконтурный направленный фильтр с чебышевской характеристикой

$\Delta\phi_{\max}$	$b_n = 1 \text{ дБ}$		$b_n = 3 \text{ дБ}$	
	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2
0,015	0,178	0,020	—	—
0,020	0,200	0,028	0,161	0,025
0,025	0,224	0,035	0,178	0,032
0,030	0,242	0,042	0,193	0,045
0,035	0,260	0,049	0,204	0,049
0,040	0,279	0,057	0,220	0,053
0,045	0,296	0,063	0,233	0,060
0,050	0,311	0,071	0,243	0,063
0,100	0,434	0,141	0,346	0,128
0,150	0,524	0,210	0,412	0,194
0,200	0,599	0,280	0,470	0,258
0,250	0,660	0,350	0,526	0,322

Пример. Спроектировать направленный фильтр, обеспечивающий в цепи направленной связи: в полосе пропускания $f_n \div f_{-n} = 3015 \div 2985 \text{ МГц}$ рабочее затухание $b_n = 1 \text{ дБ}$, а на граничных частотах заграждения $f_3 \div f_{-3} = 3030 \div 2970 \text{ МГц}$ заграждение $b_3 > 20 \text{ дБ}$.

1. Определяем параметры γ_i на граничных частотах полосы пропускания и заграждения:

$$\gamma_n = \frac{f_n}{f_0} - \frac{f_0}{f_n} = 0,01,$$

$$\gamma_3 = \frac{f_3}{f_0} - \frac{f_0}{f_3} = 0,02.$$

2. Определяем число звеньев по формулам:

а) фильтр с чебышевской характеристикой направленности

$$n = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_n - 1}}}{\operatorname{ar ch} \frac{\gamma_3}{\gamma_n}} = \frac{\operatorname{ar ch} \sqrt{\frac{100 - 1}{1,259 - 1}}}{\operatorname{ar ch} 2} = \frac{3,7}{1,32} = 2,8;$$

округляя до целых чисел, получим $n = 3$;

Таблица 11.25

Четырехконтурный направленный фильтр
с чебышевской характеристикой

$\Delta \Phi_{\text{макс}}$	$b_{\text{n}}=1 \text{ дБ}$			$b_{\text{n}}=3 \text{ дБ}$		
	γ_1	γ_2	γ_3	$\Delta \Phi_{\text{макс}}$	γ_1	γ_2
0,099	0,415	0,132	0,114	0,125	0,368	0,155
0,134	0,475	0,178	0,154	0,144	0,392	0,178
0,146	0,493	0,194	0,168	0,162	0,415	0,200
0,158	0,510	0,210	0,182	0,181	0,436	0,224
0,171	0,523	0,226	0,200	0,200	0,456	0,247
0,183	0,542	0,242	0,210	0,220	0,475	0,270
0,196	0,558	0,258	0,224	0,240	0,483	0,294
0,208	0,572	0,274	0,239	0,260	0,510	0,317
0,221	0,586	0,290	0,254	0,280	0,527	0,340
0,234	0,600	0,307	0,268	0,300	0,542	0,354
0,247	0,613	0,324	0,283	0,320	0,558	0,387
0,260	0,626	0,340	0,298	0,341	0,572	0,411
0,274	0,638	0,357	0,313	0,362	0,586	0,434
0,288	0,650	0,374	0,328	0,384	0,600	0,457
0,302	0,661	0,390	0,343	0,405	0,613	0,480
0,316	0,672	0,407	0,359	0,427	0,626	0,504
0,330	0,683	0,424	0,375	0,449	0,638	0,526
0,340	0,694	0,440	0,390	0,471	0,650	0,549
0,360	0,704	0,458	0,407	0,494	0,661	0,572
0,374	0,714	0,470	0,423	0,516	0,673	0,594
0,388	0,723	0,492	0,440	0,563	0,694	0,638
0,403	0,733	0,509	0,456	0,587	0,704	0,660
0,420	0,743	0,526	0,472	0,639	0,724	0,704
0,434	0,751	0,544	0,490	0,663	0,733	0,724
0,450	0,760	0,560	0,505	0,686	0,742	0,742
0,467	0,768	0,573	0,523	0,736	0,760	0,780
0,483	0,776	0,595	0,539	0,762	0,768	0,800
0,505	0,785	0,615	0,564	0,788	0,780	0,817
0,516	0,792	0,628	0,574	0,814	0,785	0,833
0,533	0,800	0,645	0,590	0,840	0,792	0,850
0,550	0,807	0,661	0,624	0,867	0,800	0,865
0,586	0,822	0,690	0,642	0,893	0,808	0,880
0,615	0,828	0,723	0,674	0,920	0,815	0,894
0,642	0,835	0,740	0,698	0,948	0,822	0,906
0,650	0,840	0,746	0,704	0,976	0,828	0,919
0,665	0,848	0,760	0,718	1,06	0,848	0,951
0,690	0,854	0,776	0,737	1,09	0,854	0,959
0,706	0,860	0,797	0,755	1,12	0,860	0,968
0,726	0,866	0,806	0,770	1,13	0,863	0,971
0,837	0,894	0,877	0,854			

Таблица 11.26

Пятиконтурный направленный фильтр
с чебышевской характеристикой

$\Delta \Phi_{\text{макс}}$	$b_{\text{n}}=1 \text{ дБ}$			$b_{\text{n}}=3 \text{ дБ}$		
	γ_1	γ_2	γ_3	$\Delta \Phi_{\text{макс}}$	γ_1	γ_2
0,126	0,458	0,164	0,139	0,110	0,344	0,185
0,152	0,495	0,198	0,168	0,166	0,417	0,192
0,161	0,512	0,209	0,177	0,184	0,438	0,223
0,174	0,528	0,225	0,191	0,222	0,477	0,268
0,190	0,544	0,246	0,209	0,245	0,485	0,296
0,201	0,559	0,259	0,221	0,264	0,512	0,318
0,213	0,574	0,274	0,234	0,285	0,528	0,342
0,225	0,588	0,290	0,247	0,306	0,544	0,365
0,239	0,601	0,307	0,262	0,327	0,559	0,388
0,253	0,614	0,324	0,278	0,348	0,574	0,412
0,266	0,627	0,340	0,292	0,369	0,588	0,435
0,280	0,639	0,357	0,306	0,391	0,601	0,458
0,294	0,651	0,374	0,322	0,413	0,614	0,481
0,309	0,663	0,391	0,337	0,435	0,627	0,504
0,323	0,674	0,408	0,352	0,457	0,639	0,527
0,337	0,684	0,424	0,367	0,480	0,651	0,550
0,352	0,695	0,441	0,382	0,503	0,663	0,572
0,367	0,705	0,458	0,398	0,526	0,674	0,594
0,382	0,715	0,475	0,414	0,550	0,684	0,616
0,397	0,725	0,492	0,430	0,574	0,695	0,638
0,413	0,734	0,509	0,445	0,598	0,705	0,660
0,429	0,743	0,526	0,462	0,622	0,715	0,680
0,445	0,752	0,543	0,478	0,647	0,725	0,701
0,461	0,761	0,560	0,494	0,672	0,734	0,721
0,477	0,769	0,577	0,510	0,697	0,743	0,741
0,484	0,777	0,594	0,527	0,723	0,752	0,760
0,511	0,785	0,610	0,544	0,749	0,761	0,779
0,528	0,793	0,627	0,560	0,776	0,769	0,787
0,546	0,801	0,644	0,577	0,802	0,777	0,815
0,563	0,808	0,660	0,594	0,829	0,785	0,832
0,581	0,815	0,676	0,611	0,857	0,793	0,848
0,600	0,822	0,692	0,628	0,884	0,801	0,864
0,618	0,829	0,709	0,645	0,912	0,808	0,879
0,637	0,836	0,724	0,662	0,941	0,815	0,892
0,656	0,842	0,740	0,679	0,969	0,822	0,884
0,676	0,849	0,755	0,696	0,998	0,829	0,918
0,696	0,855	0,770	0,713	1,027	0,836	0,930
0,716	0,861	0,785	0,730			
0,737	0,867	0,790	0,746			
0,757	0,872	0,814	0,763			
0,779	0,878	0,828	0,780			
0,800	0,883	0,842	0,796			

6) фильтр с максимально плоской характеристикой

$$n = \frac{\lg \sqrt{\frac{L_3 - 1}{L_{\text{п}} - 1}}}{\lg \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{III}}}} = \frac{\lg 19,5}{\lg 2} = 4,3;$$

округляя до целых чисел, получим $n = 5$.

Выбираем схему трехконтурного фильтра с чебышевской характеристикой.

3. Определяем обобщенную полосу пропускания ($\Delta\Phi_{\max}$). При заданном параметре $\gamma_{\text{п}} = 0,01$ для полосковых фильтров $\xi = \psi_0 = \pi$ имеем из формулы (11.97) $\Delta\Phi_{\max} = 0,0157$; для волноводных фильтров с сечением (72×34) мм по формуле (11.98) имеем

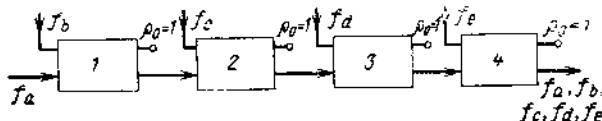


Рис. 11.36. Схема сопряжения направленных фильтров.

$$\xi = \psi_0 \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 = 1,92 \quad \text{и} \quad \Delta\Phi_{\max} = 0,03.$$

4. Определяем коэффициенты пропускания γ_1 и γ_2 .

Из табл. 11.24 для чебышевского трехконтурного полоскового фильтра при $\Delta\Phi_{\max} = 0,0157$ и $b_{\text{п}} = 1 \text{ дБ}$ находим

$$\gamma_1 = 0,178 \quad \text{и} \quad \gamma_2 = 0,02.$$

Из табл. 11.24 для чебышевского трехконтурного волноводного фильтра при $\Delta\Phi_{\max} = 0,03$ и $b_{\text{п}} = 1 \text{ дБ}$ находим

$$\gamma_1 = 0,242 \quad \text{и} \quad \gamma_2 = 0,042.$$

Заданная частотная характеристика может быть реализована одной из приведенных схем направленных фильтров; в частности, схемой петлевого полоскового фильтра (рис. 11.33, б).

На этом заканчивается первый этап синтеза; на втором этапе по найденным коэффициентам пропускания определяются геометрические размеры.

Реализация переходных ослаблений, соответствующих найденным величинам γ_i , производится методами, описанными в § 5.6 и § 10.10.

В многоканальных системах с разделением или смешиванием сигналов по радиочастоте с помощью направленных фильтров возникает необходимость определения влияний, которые вносятся в данный канал другими каналами, входящими в систему. На рис. 11.36 для примера изображена схема сопряжения четырех направленных фильтров, обеспечивающих сложение в общий тракт

колебаний с пятью частотами (m направленных фильтров образуют $m + 1$ частотный канал). Изолированные плечи направленных фильтров нагружены на согласованные нагрузки (нормированное значение которых $\rho_0 = 1$). Дополнительные потери L' , которые вносятся в каналы при сопряжении их в многоканальную систему, определяются утечкой энергии в плечах с согласованными нагрузками ($\rho_0 = 1$). Переходное ослабление между соседними каналами обусловливается, главным образом, коэффициентом направленности одиночного фильтра; его определение не представляет при сопряжении особой задачи.

Дополнительные потери в i -м канале, которые возникают при сопряжении направленных фильтров, определяются величиной

$$L'_i = \prod_{k=i+1}^m \frac{1}{|q_k|^2}. \quad (11.99)$$

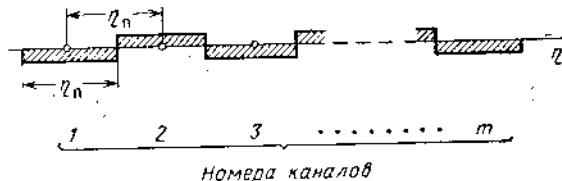


Рис. 11.37. Расположение полос пропускания в многоканальной системе.

Наибольшие дополнительные потери будут на частоте сигнала, распространяющегося в прямом направлении со входа на выход системы (на рис. 11.36 для сигнала с частотой f_a).

Величина этих потерь определяется формулой (11.99) при $i = 0$

$$L'_0 = \prod_{k=1}^m \sqrt{1 + \frac{1}{Q_{nk}^2}}. \quad (11.100)$$

Здесь Q_{nk} — полиномы, определяемые формулами (11.92) и (11.93); знак « k » введен для обозначения порядкового номера фильтра в многоканальной системе.

Для упрощения выражения (11.100) делают некоторые общие предположения относительно структуры многоканальной системы, а именно, что все каналы имеют одинаковые относительные полосы (равные γ_n), непосредственно примыкающие одна к другой (рис. 11.37) и одинаковые амплитудные коэффициенты h частотной характеристики в полосе пропускания.

Для дополнительных вносимых потерь (в децибеллах) в этом случае получим:

— фильтры с максимально плоской характеристикой

$$b'_0 = 10 \lg L'_0 = 10 \sum_{k=1}^m \lg \left[1 + \frac{1}{h^2 (2k)^{2n}} \right]; \quad (11.101)$$

— фильтры с чебышевской характеристикой

$$b'_0 = 10 \lg L'_0 = 10 \sum_{k=1}^m \lg \left[1 + \frac{1}{h^2 T_n^2 (2k)} \right]. \quad (11.102)$$

Если полосы пропускания фильтров отсчитываются на уровне 3 дБ, то в формулах (11.101) и (11.102) следует положить $h = 1$. Формулы (11.101) и (11.102) сохраняют силу и тогда, когда полосы каналов не примыкают непосредственно друг к другу так, что между ними имеются нерабочие интервалы частот, кратные ширине полосы пропускания каналов. В этом случае при расчете в суммах (11.101) и (11.102) следует пропускать те номера k , которые соответствуют интервалам между рабочими полосами каналов.

Полученные выражения позволяют выбрать число контуров в фильтрах в зависимости от допустимых дополнительных потерь в каналах при работе их в общей системе.

Зависимость дополнительных потерь при разном числе контуров и различных аппроксимациях от числа направленных фильтров в системе (при $h = 1$) дана табл. 11.27.

Таблица 11.27

Дополнительные потери (b'_0 дБ) в зависимости от числа направленных фильтров (m) в многоканальной системе и числа контуров в фильтре (n)

m	$n=1$	Фильтр с максимально плоской характеристикой		Фильтр с чебышевской характеристикой	
		$n=2$	$n=3$	$n=2$	$n=3$
1	0,969	0,253	0,067	0,088	0,0006
2	1,222	0,270	0,068	0,092	0,0007
3	1,322	0,273	0,068	0,093	0,0007
4	1,392	0,274	0,068	0,093	0,0007
5	1,435	0,274	0,068	0,093	0,0007
6	1,465	0,274	0,068	0,093	0,0007
7	1,466	0,274	0,068	0,093	0,0007
8	1,466	0,274	0,068	0,093	0,0007

Реальные направленные фильтры имеют хотя и малые, но конечные коэффициенты отражения. При сопряжении их в многоканальную систему эффект отражений может накапливаться. Для оценки входного коэффициента отражения системы можно воспользоваться вероятностными соотношениями в § 3.8.

ЛИТЕРАТУРА

- Рид и Уиллер. Метод исследования симметричных цепей с четырьмя выводами. «Вопросы радиолокационной техники». Изд-во иностранной литературы, 1957, 3 (39).
- Ribbel H. The Short slot Hybrid Junction, Proc. IRE, 1952, v. 40, № 2.
- Справочник по волноводам. Пер. с англ. под. ред. Я. Н. Фельда. Изд-во «Советское радио», 1952.
- Фельдштейн А. Л. и Жаворонкова Е. С. Расчет чебышевских направленных ответвителей со слабой связью. «Радиотехника», 1962, 17, № 1.
- Вольперт А. Р. Теоретическое и экспериментальное исследование фидерного рефлектометра, «Радиотехника», 1941, № 2, 2.
- Фельдштейн А. Л. Синтез ступенчатых направленных ответвителей, «Радиотехника и электроника», 1961, 6, № 2.
- Shimizu J., Tripled Directional Couplers, IRE Wescon, Conv. Record, 1957, August, pt. 1.
- Фельдштейн А. Л. Ступенчатые мосты, «Радиотехника и электроника», 1961, т. 6, № 9.
- Reed J. The Multiple Branch Waveguide Coupler, Trans. IRE, 1958, October, v. MTT-6, № 4.
- «Полосковые системы сверхвысоких частот». Сб. статей под ред. В. И. Сушкича. Изд-во иностранной литературы, 1959.
- Коган Н. Л., Машковцев Б. М., Цибизов К. Н. Сложные волноводные системы. Судпромгиз, 1963.
- Stone R. E. Microwave Multiplexing Circuits. Electronic Industries, 1958, v. 17, № 11, p. 62—65.
- Сурдин М. Направленные ответвители в волноводах. Proc. IEE, 1946, p. III-A, № 4.
- Ахисер А. И. О связи прямоугольных волноводов с помощью отверстия в широкой стенке. ЖТФ, 1960, т. XXX, вып. 6.
- Машковцев Б. М., Бенсман Л. З., Хохрек А. А. Широкополосный волноводный направленный ответвитель. «Радиотехника», 1960, т. 15, № 4.
- Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи. Изд-во «Советское радио», 1955.
- Ширман Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. Связьиздат, 1959.
- Машковцев Б. М., Цибизов К. Н. и Емелин Б. Ф. Теория волноводов. Изд-во «Наука», 1966.
- Кон С., Коал Ф. Направленные фильтры для разделения каналов. «Вопросы радиолокационной техники», 1957, № 2 (38).
- Лаговьер Б. Б. Направленный фильтр с двумя кольцевыми резонаторами. «НДВШ — радиотехника и электроника», 1959, № 2.
- Коал Ф. Применение направленных фильтров для многоканальных систем. Trans. IRE, 1958, v. MTT-6, № 4.
- Машковцев Б. М. Метод анализа многоконтурных направленных фильтров с врачающейся поляризацией поля. «Радиотехника», 1962, т. 17, № 6.

3 дб
лосы
что в
рине
max
соотн
в фи
в ка
ров
в си

т

Александр Львович Фельдштейн
Лев Рафаэлович Явич
Виталий Петрович Смирнов

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕМЕНТАМ
ВОЛНОВОДНОЙ ТЕХНИКИ

Редактор В. Г. Машарова
Художественный редактор В. Т. Сидоренко
Технический редактор В. В. Беляева
Корректоры: Е. П. Озерецкая, Н. С. Швыгина,
Н. М. Белякова

Сдано в набор 18. X. 1966 г. Подписано к печати 1. VI. 1967 г. Т-08425
Формат 84×108^{1/32}. Бумага типографская № 2
Объем 34,23 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 39,975. Тираж 20 000 экз.
Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, ш/я 693
Заказ 782 Московская типография № 4 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Б. Переяславская ул., 46
Цена в переплете № 5—2 р. 18 к.

коп
кан
оцен
зовы
650