

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

Д. А. Федотов, В. С. Черноусова

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ  
«ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

Утверждено методическим советом университета

УДК 621.3.011.7 (076.5)

ББК 31.211.61я73

Ф34

**Учебно-методическое пособие к выполнению курсового проекта при изучении дисциплины «Теория линейных электрических цепей» / Д. А. Федотов, В. С. Черноусова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2022. 38 с.**

Учебно-методическое пособие содержит основные сведения о характеристиках и параметрах двух- и четырехполюсников. Приведены математические выражения для расчета собственных, повторных и рабочих параметров схем четырехполюсников, расчет эквивалентных пассивных четырехполюсников по основной матрице типа  $A$ .

Предназначено для студентов 2-го курса очной и 3-го курса заочной форм обучения специальности «Системы обеспечения движения поездов», специализаций «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта», «Радиотехнические системы на железнодорожном транспорте».

Библиогр.: 3 назв. Табл. 4. Рис. 13.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент И. В. Никонов;  
канд. техн. наук, доцент Т. В. Ковалева.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Общие положения .....	6
2. Синтез схем реактивных двухполюсников .....	7
3. Расчет входных сопротивлений четырехполюсника в режимах холостого хода и короткого замыкания .....	18
4. Определение основной матрицы исследуемого четырехполюсника .....	22
5. Расчет характеристических, повторных и рабочих параметров четырехполюсника .....	26
5.1. Расчет характеристических параметров четырехполюсника .....	26
5.2. Повторные параметры четырехполюсника .....	28
5.3. Расчет рабочих параметров четырехполюсника .....	29
6. Эквивалентность четырехполюсников .....	33
7. Экспериментальная проверка результатов теоретических расчетов.....	34
8. Задание на курсовой проект .....	34
Библиографический список .....	35



## ВВЕДЕНИЕ

Задача высшего специального образования – научить студента разбираться в большом объеме разнообразной технической информации.

Одной из основных общеинженерных дисциплин для инженеров-электриков любой специализации является «Теория линейных электрических цепей» (ТЛЭЦ). Курс ТЛЭЦ дает знания, необходимые для изучения специальных курсов. Линейные электрические цепи – это электрические системы, которые входят в состав любых устройств электросвязи. Некоторые устройства, содержащие, например, электронные приборы, нельзя считать линейными электрическими цепями, но в определенном режиме работы такие устройства имеют свойства электрических цепей, и анализ их работы производится на основе ТЛЭЦ. В курсе ТЛЭЦ изучаются методы расчета электрических устройств, которые являются общими для линейных цепей и любых электрических систем.

Без знания ТЛЭЦ невозможно совершенствовать и разрабатывать новые системы электросвязи, нельзя обеспечить грамотное техническое обслуживание эксплуатационного оборудования.

Выполнение курсового проекта по дисциплине ТЛЭЦ способствует закреплению теоретических знаний по основным разделам курса – «Двухполюсники» и «Четырехполюсники» – и получению практических навыков, необходимых при эксплуатации, проектировании, разработке и усовершенствовании телекоммуникационных устройств.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При проектировании современных устройств телекоммуникаций решаются многочисленные задачи, связанные с использованием электрических явлений для передачи и обработки информации. В общем случае электрическая цепь состоит из источников электрической энергии, приемников и промежуточных звеньев, связывающих источники с приемниками. При выполнении курсового проекта необходимо произвести анализ и синтез основных промежуточных элементов: двух- (ДП) и четырехполюсников (ЧП).

Задача анализа электрической цепи – определение реакции цепи  $y(t)$ ,  $y(\omega)$  на заданное внешнее воздействие  $x(t)$ ,  $x(\omega)$ . Задача синтеза – нахождение цепи по заданной ее реакции  $y(t)$ ,  $y(\omega)$  на заданное внешнее воздействие  $x(t)$ ,  $x(\omega)$ .

Исходными данными в задаче анализа являются эквивалентная схема ДП (ЧП) и значения параметров всех входящих в нее элементов; описание внешнего воздействия.

В результате анализа определяется отклик (реакция) цепи в виде совокупности токов и напряжений. В зависимости от того, какая величина – частота или время – является аргументом в выражениях, описывающих соотношения между откликом и внешним воздействием, различают частотные и временные характеристики цепи.

Исходные данные в задаче синтеза: описание внешнего воздействия  $x(\omega)$  и его отклика  $y(\omega)$ .

В задаче синтеза необходимо определить эквивалентную схему цепи и значения параметров всех входящих в нее элементов.

Анализ и синтез электрических цепей взаимосвязаны. Методы синтеза базируются на использовании общих свойств характеристик различных классов цепей, которые изучаются в процессе анализа.

В задании к курсовому проекту приводится схема синтезируемого ЧП, составными частями которого являются ДП с известной частотной зависимостью сопротивления в символической или операторной форме.

В электрической цепи с сосредоточенными параметрами типа  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (рис. 1.1) уравнение равновесия напряжения с подключенным внешним источником имеет вид:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = u(t). \quad (1.1)$$

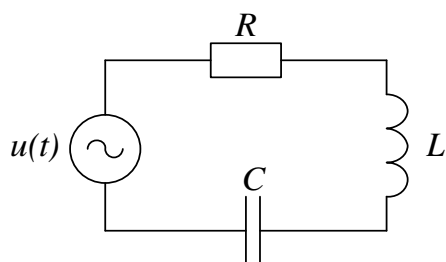


Рис 1.1. Электрическая цепь с сосредоточенными параметрами

При изображении установившихся гармонических напряжения и тока функцией  $e^{j\omega t}$  интегродифференциальное уравнение равновесия напряжения (тока) (1.1) превращается в алгебраическое. То же самое упрощение получается, когда зависимости  $u(t)$  и  $i(t)$  от времени отображаются функцией  $e^{pt}$ , где  $p$  – любое комплексное число. Тогда

$$u(t) = \dot{U}e^{pt} = (R + pL + \frac{1}{pC})\dot{I}e^{pt}. \quad (1.2)$$

Отсюда  $\dot{U} = \dot{I} \cdot Z(p)$  или  $\dot{I} = \dot{U} \cdot Y(p)$ , где  $Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC}$  – операторное сопротивление;  $Y(p) = \frac{1}{Z(p)}$  – операторная проводимость ДП.

Для реактивных ДП комплексное число  $p$  может быть заменено на  $j\omega$  ( $p = j\omega$ ) и операторные характеристики совпадают с частотными. Таким образом, при решении задач курсового проекта можно воспользоваться символическим или операторным методом.

## 2. СИНТЕЗ СХЕМ РЕАКТИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Функция  $Z(p)$  или  $Y(p)$ , по которой можно построить соответствующую электрическую цепь, называется физически реализуемой. Реализуемая функция сопротивления (проводимости) должна иметь вид рациональной дроби:

$$Z(p) = \frac{A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p^1 + A_0}{B_n p^n + B_{n-1} p^{n-1} + \dots + B_1 p^1 + B_0} = \frac{A(p)}{B(p)}. \quad (2.1)$$

Многочлены в числителе и знаменателе рациональной дроби удобнее всего представить в виде произведения множителей вида  $(p - p_i)$ , где  $p_i$  – корни многочленов  $A(p)$  и  $B(p)$ :

$$Z(p) = \frac{A_n (p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n)}{B_m (p - p_{x1})(p - p_{x2}) \dots (p - p_{xm})}. \quad (2.2)$$

Значения переменного  $p$ , соответствующие корням многочлена  $A(p)$ , обращают функцию  $Z(p)$  в ноль и называются нулями функции  $Z(p)$ . При значениях  $p$ , соответствующих корням многочлена  $B(p)$ , функция  $Z(p)$  становится неограниченно большой. Корни многочлена  $B(p)$  являются полюсами функции операторного сопротивления  $Z(p)$ . Нули и полюсы физически реализуемой функции  $Z(p)$  всегда чередуются.

После определения нулей и полюсов функции  $Z(p)$  ДП строится полюсно-нулевое изображение на плоскости комплексного переменного.

При построении схемы ДП по заданному (ым) значению (ям) операторного сопротивления  $Z(p)$  требуется выполнить следующие этапы синтеза:

1) выявить необходимые и достаточные условия, которым должна удовлетворять функция  $Z(p)$  для того, чтобы существовала хотя бы одна реализуемая цепь;

2) если функция  $Z(p)$  задана графиком (таблицей), то необходимо подобрать рациональную функцию, наиболее точно воспроизводящую все свойства ДП, заданные графиком;

3) рассчитать все канонические схемы ДП, удовлетворяющие заданному выражению;

4) выбрать оптимальную из рассчитанных цепей для практического использования, имея в виду, что большие значения индуктивности элементов схем ДП нежелательны при реализации.

На первом этапе синтеза все заданные формулы функции  $Z(p)$  проверяются на следующие необходимые и достаточные условия:

функция  $Z(p)$  реализуема, если она положительна и действительна, все коэффициенты при операторе  $p$  – только вещественные и положительные числа;

высшие и низшие степени многочленов числителя и знаменателя функции  $Z(p)$  различаются не более чем на единицу;

нули и полюсы функции  $Z(p)$  пассивных ДП расположены в левой полуплоскости комплексного переменного. При этом мнимые корни бывают комплексно-сопряженными, нули и полюсы чередуются, отсутствуют кратные (одинаковые) корни;

если корни (нули и полюсы) функции  $Z(p)$  расположены на мнимой оси, то такая функция соответствует реактивному ДП. При этом в числителе (знаменателе) функции оператор  $p$  имеет только четные степени, а в знаменателе (числителе) – только нечетные. Разница между высшими и низшими степенями



оператора  $p$  у числителя и знаменателя равна единице. Высшая степень оператора  $p$  равна числу реактивных элементов в канонической схеме.

Удобнее всего представить исследуемый ДП в виде одной из четырех канонических схем, поэтому синтез пассивных ДП осуществляется двумя методами разложения:

на простые дроби, в результате чего при условии физической реализуемости получают канонические схемы Фостера первого или второго рода;

в непрерывные (цепные) дроби, при этом получают канонические схемы Кауэра первого или второго рода (лестничные схемы).

Наиболее распространен первый метод разложения. При выделении простых слагаемых из функции  $Z(p)$  получают последовательное соединение двухэлементных резонансных контуров (схему Фостера первого рода).

При разложении функции  $Y(p)$  на простые слагаемые реализуется схема Фостера второго рода (параллельное соединение простых  $LC$ -элементов).

Для самого общего случая реактивного ДП класса « $\infty - \infty$ » (рис. 2.1) функция сопротивления имеет вид:

$$\begin{aligned} Z(p) &= \frac{L_{2n+2}(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_3^2) \dots (p^2 + \omega_{2n-1}^2)}{p(p^2 + \omega_2^2)(p^2 + \omega_4^2) \dots (p^2 + \omega_{2n-2}^2)} = \\ &= pL_{2n+2} + \frac{1}{pC_{2n+2}} + \sum_{i=1}^n \frac{p}{C_{2i}(p^2 + \omega_{2i}^2)}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $pL_{2n+2}$  – целая часть дроби (полюс при  $p = \infty$ );

$\frac{1}{pC_{2n+2}}$  – полюс при  $p = 0$ ;

$\frac{p}{C_{2i}(p^2 + \omega_{2i}^2)}$  – пары мнимых полюсов функции при  $p = \pm j\omega_i$ .

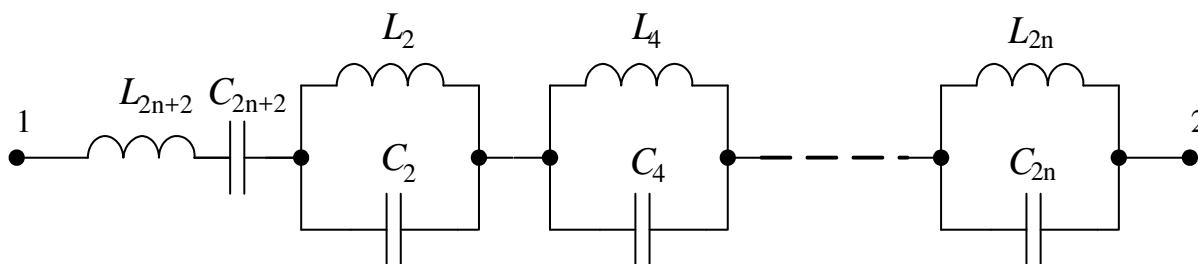


Рис. 2.1. Схема двухполюсника класса « $\infty - \infty$ » (общий случай)

Значения коэффициентов  $L_{2n+2}, C_{2n+2}, C_{2i}$  в функции (2.3) определяются методом разложения:

$$L_{2n+2} = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{Z(p)}{p}; \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{C_{2n+2}} = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot Z(p); \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{C_{2i}} = \lim_{p^2 \rightarrow \omega_{2i}^2} Z(p) \cdot \frac{p^2 + \omega_{2i}^2}{p}. \quad (2.6)$$

Учитывая, что  $\omega_{2i}^2 = \frac{1}{L_{2i}C_{2i}}$ , можно определить элементы  $C_{2i}, L_{2i}, L_{2n+2}, C_{2n+2}$  схемы.

В качестве примера определим элементы схемы, сопротивление которой задано рациональной дробью в операторной форме:

$$Z(p) = \frac{0,05p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)}{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8)}. \quad (2.7)$$

Выявляем необходимые и достаточные условия физической реализации схемы ДП. Строим полюсно-нулевое изображение (рис. 2.2, а) и характеристическую строку (рис. 2.2, б). По ним определяем класс ДП, количество резонансов, элементов и вид схемы.

Допустим, выбрали схему Фостера первого рода, состоящую из пяти элементов (высшая степень оператора  $p$  – пятая). Так как класс ДП «0 –  $\infty$ » (это видно из полюсно-нулевого изображения функции  $Z(p)$ ), то схема примет вид, изображенный на рис. 2.2, в.

Тогда из уравнений (2.4) – (2.6) функция

$$Z(p) = pL_1 + \frac{p}{C_2(p^2 + \omega_1^2)} + \frac{p}{C_4(p^2 + \omega_3^2)}. \quad (2.8)$$

Используя уравнения (2.4) – (2.6), получим:

$$L_1 = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)}{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8) \cdot p}; \quad (2.9)$$

$$L_1 = 50 \cdot 10^{-3} \Gamma_{\text{H}};$$

$$\frac{1}{C_2} = \lim_{p^2 \rightarrow -1 \cdot 10^8} \frac{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)}{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8)} \cdot \frac{(p^2 + 1 \cdot 10^8)}{p}; \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{C_2} = \frac{0,05 \cdot (-1 \cdot 10^8 + 2 \cdot 10^8) \cdot (-1 \cdot 10^8 + 9 \cdot 10^8)}{(-1 \cdot 10^8 + 4 \cdot 10^8)} = 1,333 \cdot 10^7;$$

$$C_2 = \frac{1}{1,333 \cdot 10^7} = 75 \text{ нФ};$$

$$L_2 = \frac{1}{\omega_1^2 C_2}; \quad (2.11)$$

$$L_2 = \frac{1}{1 \cdot 10^8 \cdot 75 \cdot 10^{-9}} = 133 \text{ мГн};$$

$$\frac{1}{C_3} = \lim_{p^2 \rightarrow -4 \cdot 10^8} \frac{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)}{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8)} \cdot \frac{(p^2 + 4 \cdot 10^8)}{p}; \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{C_3} = \frac{0,05 \cdot (-4 \cdot 10^8 + 2 \cdot 10^8) \cdot (-4 \cdot 10^8 + 9 \cdot 10^8)}{(-4 \cdot 10^8 + 1 \cdot 10^8)} = 1,667 \cdot 10^7;$$

$$C_3 = \frac{1}{1,667 \cdot 10^7} = 60 \text{ нФ};$$

$$L_3 = \frac{1}{\omega_3^2 C_3}; \quad (2.13)$$

$$L_3 = \frac{1}{4 \cdot 10^8 \cdot 60 \cdot 10^{-9}} = 42 \text{ мГн}.$$

Если использовать функцию  $Y(p) = 1/Z(p)$ , то в результате разложения на простые дроби получим схему Фостера второго рода (рис. 2.2, з) того же класса («0 – ∞»):

$$Y(p) = \frac{1}{pL_1'} + \frac{p}{L_2'(p^2 + \omega_2^2)} + \frac{p}{L_3'(p^2 + \omega_4^2)}. \quad (2.14)$$

Используя уравнения (2.4) – (2.6), получим:

$$\frac{1}{L_1'} = \lim_{p \rightarrow 0} Y(p) \cdot p = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8) \cdot p}{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)}; \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{L_1'} = \frac{1 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^8}{0,05 \cdot 2 \cdot 10^8 \cdot 9 \cdot 10^8} = \frac{1}{0,225};$$

$$L_1' = 225 \text{ мГн};$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_2'} &= \lim_{p^2 \rightarrow -\omega_2^2} Y(p) \cdot \frac{(p^2 + \omega_2^2)}{p} = \\ &= \lim_{p^2 \rightarrow -2 \cdot 10^8} \frac{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8)}{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)} \cdot \frac{(p^2 + 2 \cdot 10^8)}{p}; \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{L_2'} = \frac{(-2 \cdot 10^8 + 1 \cdot 10^8) \cdot (-2 \cdot 10^8 + 4 \cdot 10^8)}{0,05 \cdot -2 \cdot 10^8 \cdot (-2 \cdot 10^8 + 9 \cdot 10^8)} = \frac{1}{0,35};$$

$$L_2' = 350 \text{ мГн};$$

$$C_2' = \frac{1}{\omega_2^2 L_2'}; \quad (2.17)$$

$$C_2' = \frac{1}{2 \cdot 10^8 \cdot 0,35} = 14,29 \text{ нФ};$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_3} &= \lim_{p^2 \rightarrow -\omega_4^2} Y(p) \cdot \frac{(p^2 + \omega_4^2)}{p} = \\ &= \lim_{p^2 \rightarrow -9 \cdot 10^8} \frac{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8)}{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)} \cdot \frac{(p^2 + 9 \cdot 10^8)}{p}; \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{L_3} = \frac{(-9 \cdot 10^8 + 1 \cdot 10^8) \cdot (-9 \cdot 10^8 + 4 \cdot 10^8)}{0,05 \cdot -9 \cdot 10^8 \cdot (-9 \cdot 10^8 + 2 \cdot 10^8)} = \frac{1}{0,079};$$

$$L_3 = 79 \text{ мГн};$$

$$C_3 = \frac{1}{\omega_4^2 L_3}; \quad (2.19)$$

$$C_3 = \frac{1}{9 \cdot 10^8 \cdot 0,079} = 14,06 \text{ нФ}.$$

При разложении в непрерывную дробь функции  $Z(p)$  по нисходящим степеням оператора  $p$  получим значения элементов схемы Кауэра первого рода (рис. 2.2, д):

$$Z(p) = Z_1 + \frac{1}{Y_1 + \frac{1}{Z_2 + \frac{1}{Y_3 + \frac{1}{Z_3}}}}. \quad (2.20)$$

Для дальнейшего разложения по схемам Кауэра необходимо раскрыть все скобки в числителе и знаменателе  $Z(p)$ :

$$Z(p) = \frac{0,05 p \cdot (p^2 + 2 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 9 \cdot 10^8)}{(p^2 + 1 \cdot 10^8) \cdot (p^2 + 4 \cdot 10^8)} = \frac{0,05 p^5 + 5,5 \cdot 10^7 p^3 + 9 \cdot 10^{15} p}{p^4 + 5 \cdot 10^8 p^2 + 4 \cdot 10^{16}};$$

$$\begin{array}{r}
- \frac{0,05p^5 + 5,5 \cdot 10^7 p^3 + 9 \cdot 10^{15} p}{0,05p^5 + 2,5 \cdot 10^7 p^3 + 2 \cdot 10^{15} p} \left| \frac{p^4 + 5 \cdot 10^8 p^2 + 4 \cdot 10^{16}}{0,05p} \rightarrow Z_1 = pL_{11} \right. \\
- \frac{p^4 + 5 \cdot 10^8 p^2 + 4 \cdot 10^{16}}{p^4 + 2,333 \cdot 10^8 p^2} \left| \frac{3 \cdot 10^7 p^3 + 7 \cdot 10^{15} p}{3,333 \cdot 10^{-8} p} \rightarrow Y_1 = pC_{11} \right. \\
- \frac{3 \cdot 10^7 p^3 + 7 \cdot 10^{15} p}{3 \cdot 10^7 p^3 + 4,5 \cdot 10^{15} p} \left| \frac{2,667 \cdot 10^8 p^2 + 4 \cdot 10^{16}}{0,112p} \rightarrow Z_2 = pL_{12} \right. \\
- \frac{2,667 \cdot 10^8 p^2 + 4 \cdot 10^{16}}{2,667 \cdot 10^8 p^2} \left| \frac{2,5 \cdot 10^{15} p}{1,067 \cdot 10^{-7} p} \rightarrow Y_2 = pC_{12} \right. \\
- \frac{2,5 \cdot 10^{15} p}{2,5 \cdot 10^{15} p} \left| \frac{4 \cdot 10^{16}}{0,063p} \rightarrow Z_3 = pL_{13} \right. \\
0
\end{array}$$

При разложении в непрерывную дробь функции  $Y(p)$  по восходящей степени оператора  $p$  получим значения элементов схемы Кауэра второго рода (рис. 2.2, е):

$$Y(p) = Y_1' + \frac{1}{Z_1' + \frac{1}{Y_2' + \frac{1}{Z_2' + \frac{1}{Y_3'}}}} = \frac{1}{pL_{21}} + \frac{1}{\frac{1}{pC_{21}} + \frac{1}{\frac{1}{pL_{22}} + \frac{1}{\frac{1}{pC_{22}} + \frac{1}{pL_{23}}}}}}; \quad (2.21)$$

$$Y(p) = \frac{4 \cdot 10^{16} + 5 \cdot 10^8 p^2 + p^4}{9 \cdot 10^{15} p + 5,5 \cdot 10^7 p^3 + 0,05 p^5};$$

$$\begin{array}{r}
- \frac{4 \cdot 10^{16} + 5 \cdot 10^8 p^2 + p^4}{4 \cdot 10^{16} + 2,444 \cdot 10^8 p^2 + 0,222 p^4} \left| \frac{9 \cdot 10^{15} p + 5,5 \cdot 10^7 p^3 + 0,05 p^5}{1/0,225p} \rightarrow Y_1' = 1/pL_{21} \right. \\
- \frac{9 \cdot 10^{15} p + 5,5 \cdot 10^7 p^3 + 0,05 p^5}{9 \cdot 10^{15} p + 2,739 \cdot 10^7 p^3} \left| \frac{2,556 \cdot 10^8 p^2 + 0,778 p^4}{1/2,84 \cdot 10^{-8} p} \rightarrow Z_1' = 1/pC_{21} \right. \\
- \frac{2,556 \cdot 10^8 p^2 + 0,778 p^4}{2,556 \cdot 10^8 p^2 + 0,463 p^4} \left| \frac{2,761 \cdot 10^7 p^3 + 0,05 p^5}{1/0,108p} \rightarrow Y_2' = 1/pL_{22} \right. \\
- \frac{2,761 \cdot 10^7 p^3 + 0,05 p^5}{2,761 \cdot 10^7 p^3} \left| \frac{0,315 p^4}{1/1,141 \cdot 10^{-8} p} \rightarrow Z_2' = 1/pC_{22} \right. \\
- \frac{0,315 p^4}{0,315 p^4} \left| \frac{0,05 p^5}{1/0,159p} \rightarrow Y_3' = 1/pL_{23} \right. \\
0
\end{array}$$

$$Y(p) = \frac{1}{0,225p} + \frac{1}{\frac{1}{2,84 \cdot 10^{-8}p} + \frac{1}{\frac{1}{0,108p} + \frac{1}{\frac{1}{1,141 \cdot 10^{-8}p} + \frac{1}{0,159p}}}}.$$

При сравнении схем, приведенных на рис. 2.2, видно, что в схемах рис. 2.2, в, г, е значения индуктивностей больше, чем в схеме рис. 2.2, д, хотя количество катушек индуктивности одинаковое. Для физической реализации более целесообразно использовать схему ДП, изображенную на рис. 2.2, д.

Таким образом, при выполнении курсового проекта на первом этапе требуется произвести следующие действия:

- 1) определить класс заданных ДП, их резонансные частоты, построить полюсно-нулевые изображения и характеристические строки;
- 2) выявить необходимые и достаточные условия физической реализуемости всех ДП, заданных функцией  $Z(p)$  или  $Y(p)$  в исходных данных;
- 3) определить все возможные канонические схемы ДП, используя методы разложения на простые дроби и в непрерывные цепные дроби;
- 4) выбрать оптимальную схему ДП и использовать ее в дальнейшем при расчетах;
- 5) выполнить расчет сопротивлений заданных ДП и построить графики их частотной зависимости.

При построении графика необходимо задаваться тремя значениями частоты в диапазонах между конечными ( $\omega = 0$  и  $\omega = \infty$ ) и резонансными частотами ДП. Например, для ДП (см. рис. 2.2) резонансные частоты таковы:  $\omega_1 = 1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,414 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_3 = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_4 = 3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ . Результаты расчета сопротивления  $Z(p)$  сведены в табл. 2.1, а график функции  $Z(p)$  приведен на рис. 2.3.

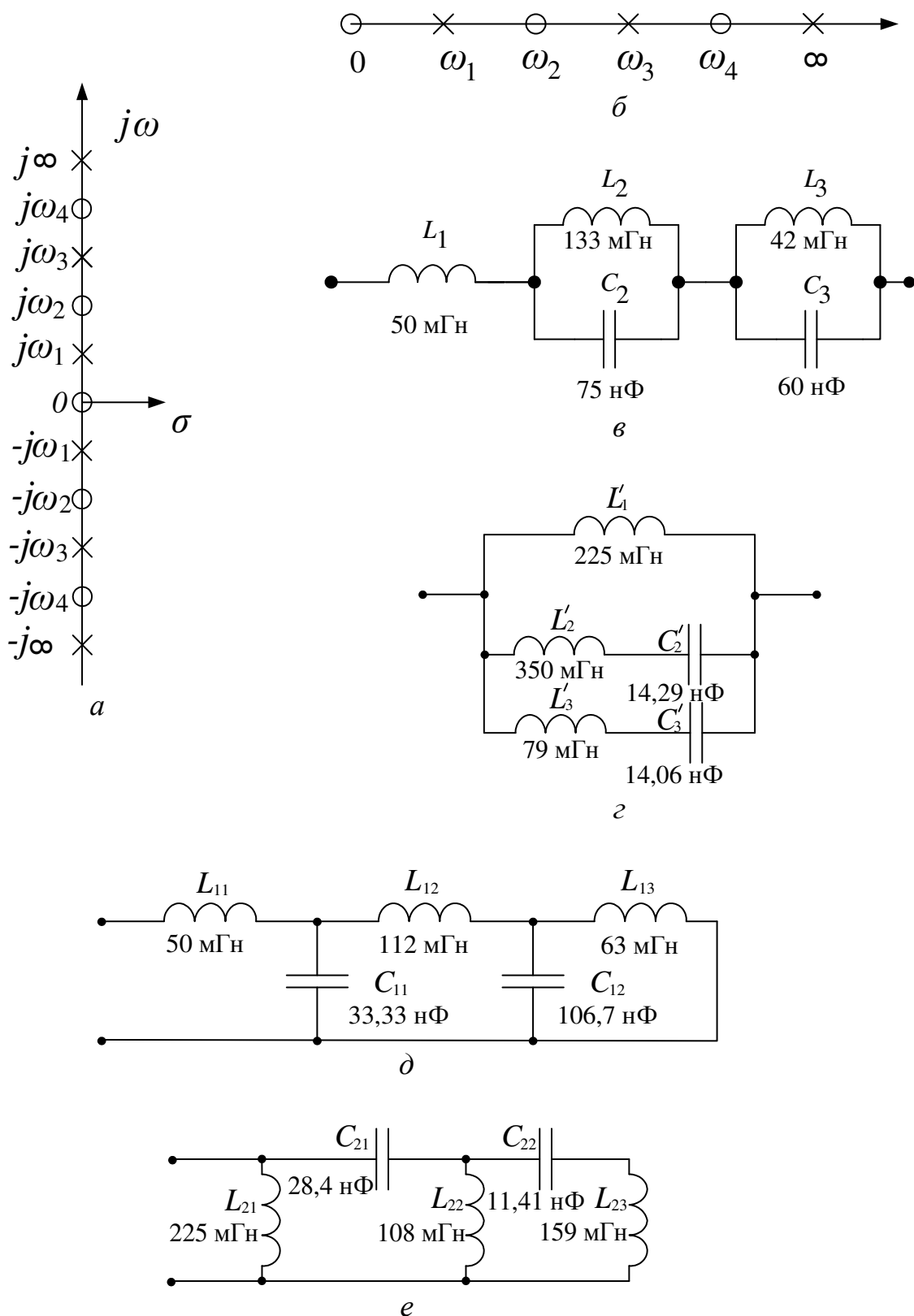


Рис. 2.2. Синтез реактивных двухполюсников:  
 а – полюсно-нулевое изображение функции  $Z(p)$ ; б – характеристическая строка; в – схема Фостера первого рода; г – схема Фостера второго рода; д – схема Кауэра первого рода; е – схема Кауэра второго рода



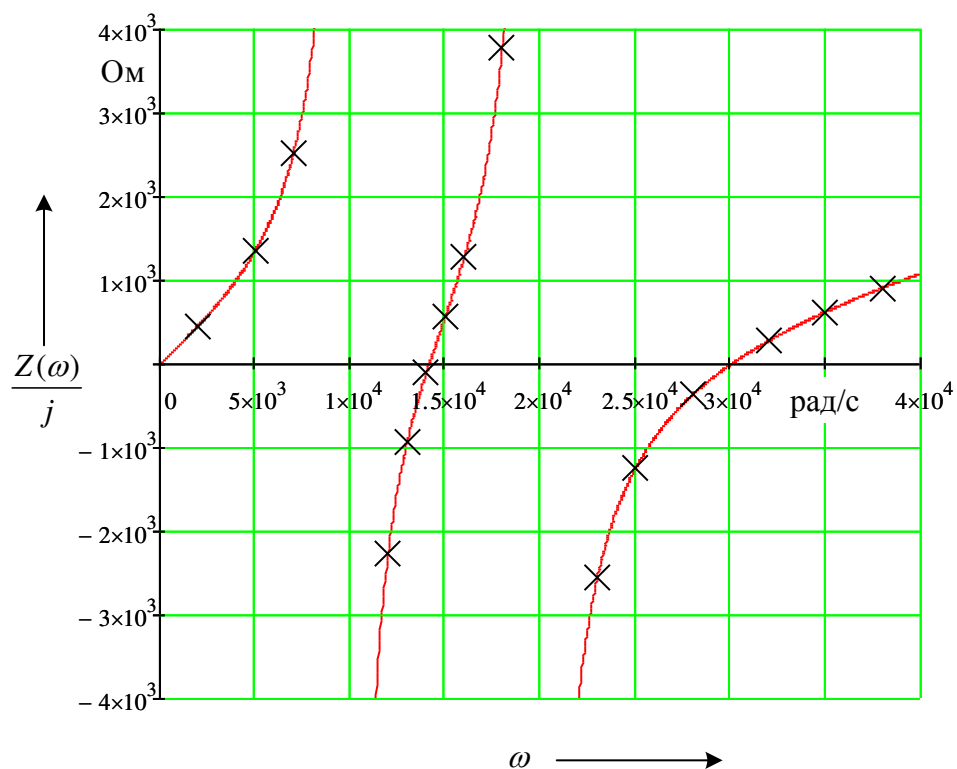


Рис. 2.3. Частотная зависимость сопротивления двухполюсника

Таблица 2.1

Расчет сопротивления  $Z(p)$

Параметр	Значение параметра										
$\omega \cdot 10^{-4}$ , рад/с	0	0,2	0,5	0,7	1	1,2	1,3	1,4	1,414	1,5	1,6
Z, Ом	0	j462	j1362	j2512	$\infty$	-j2255	-j924	-j101	0	j579	j1284
$\omega \cdot 10^{-4}$ , рад/с	1,8	2	2,3	2,5	2,8	3	3,2	3,5	3,8	$\infty$	
Z, Ом	j3776	$\infty$	-j2536	-j1237	-j361	0	j284	j628	j916	$\infty$	

Результатом выполнения первого раздела курсового проекта будет являться элементная схема рассчитанного исследуемого ЧП.

### 3. РАСЧЕТ ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Четырехполусную цепь (рис. 3.1), имеющую вход и выход, следует характеризовать связями между двумя напряжениями ( $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ ) и двумя токами ( $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ ).

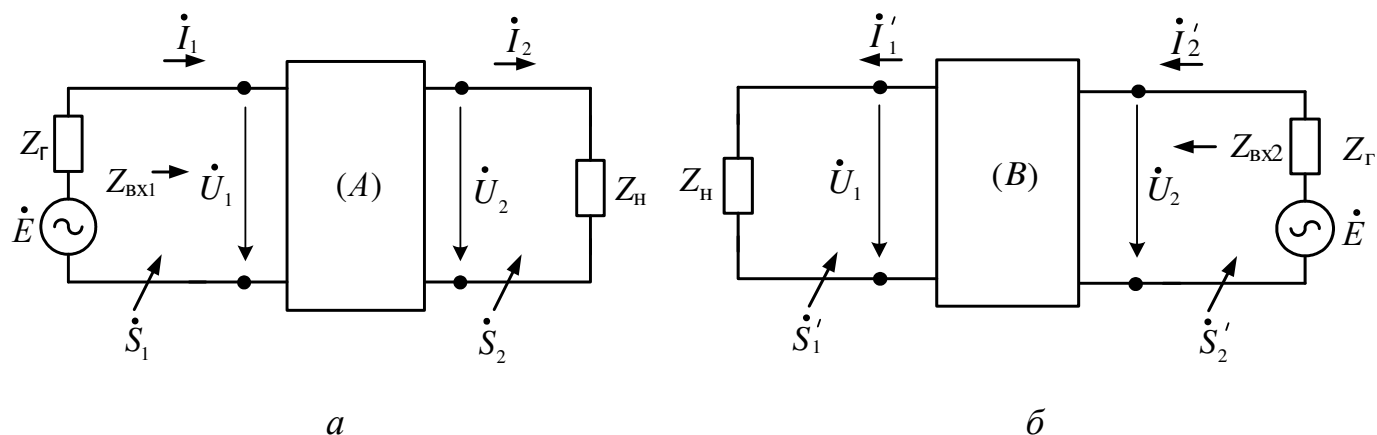


Рис. 3.1. Схема четырехполосника:  
а – прямое направление передачи; б – обратное

Входным сопротивлением ЧП называется такое полное сопротивление ЧП переменному току, которое может быть измерено со стороны его входных зажимов при условии замыкания его выходных зажимов на заранее заданное сопротивление.

При прямом направлении передачи (рис. 3.1, а)

$$Z_{\text{вх1}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}, \quad (3.1)$$

при обратном (рис. 3.1, б)

$$Z_{\text{вх2}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}'_2}. \quad (3.2)$$

Входное сопротивление ЧП относится к числу его внешних (рабочих) параметров, зависит от направления передачи, нагрузки и собственных параметров.

В данном разделе курсового проекта необходимо составить схемы исследуемого ЧП в режимах холостого хода и короткого замыкания для прямого и обратного направлений передачи сигнала. По полученным схемам составить выражения для нахождения входных сопротивлений, рассчитать их и результаты расчетов оформить в виде сводной таблицы и графиков частотной зависимости.

В режиме холостого хода для прямой передачи сопротивление приемника на зажимах 2 – 2' принимает значение бесконечности, поэтому ток на выходе равен нулю ( $\dot{I}_2 = 0$ ;  $Z_n = \infty$ ). Данное входное сопротивление обозначается так:

$$Z_{\text{вх1}}^{\infty} = Z_{\text{х. х}}. \quad (3.3)$$

В режиме короткого замыкания для прямой передачи сопротивление приемника на зажимах 2 – 2' принимает значение нуля, поэтому напряжение на выходных зажимах равно нулю ( $\dot{U}_2 = 0$ ;  $Z_n = 0$ ). Данное входное сопротивление обозначается так:

$$Z_{\text{вх1}}^0 = Z_{\text{к. з}}. \quad (3.4)$$

При обратном направлении передачи энергии (см. рис. 3.1, б) в режиме холостого хода ( $\dot{I}'_1 = 0$ ;  $Z'_n = \infty$ )

$$Z_{\text{вх2}}^{\infty} = Z'_{\text{х. х}}; \quad (3.5)$$

в режиме короткого замыкания ( $\dot{U}'_1 = 0$ ;  $Z'_n = 0$ )

$$Z_{\text{вх2}}^0 = Z'_{\text{к. з}}. \quad (3.6)$$

В качестве примера рассмотрим несимметричную схему Т-образно мостового ЧП (рис. 3.2).

Составим схемы в режиме холостого хода и короткого замыкания для прямой передачи сигнала (рис. 3.3).

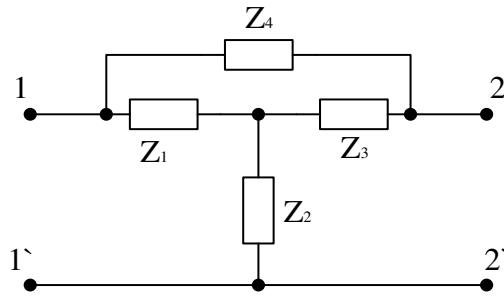


Рис. 3.2. Схема несимметричного Т-образно мостового ЧП

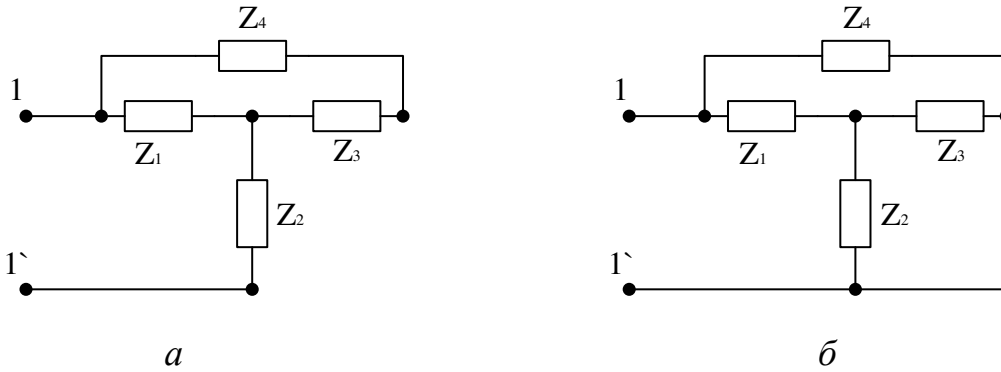


Рис. 3.3. Схемы несимметричного Т-образно мостового ЧП  
для прямой передачи в режимах:  
*a* – холостого хода; *б* – короткого замыкания

Разместим зажимы 1 и 1' слева и справа для лучшего восприятия полученных схем (рис. 3.4).

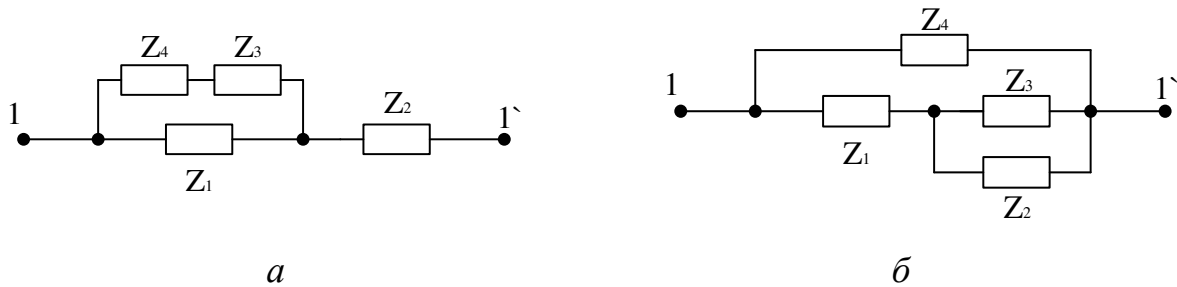


Рис. 3.4. Преобразованные схемы несимметричного Т-образно мостового ЧП  
для прямой передачи в режимах:  
*a* – холостого хода; *б* – короткого замыкания

По полученным схемам составляются выражения для расчета входных сопротивлений:

$$Z_{\text{вх1}}^{\infty} = \frac{Z_1 \cdot (Z_3 + Z_4)}{Z_1 + Z_3 + Z_4} + Z_2; \quad (3.7)$$

$$Z_{\text{вх1}}^0 = \frac{Z_4 \cdot \left( Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} \right)}{Z_4 + Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}. \quad (3.8)$$

Аналогично составляем схемы в режиме холостого хода и короткого замыкания для обратной передачи сигнала (рис. 3.5).

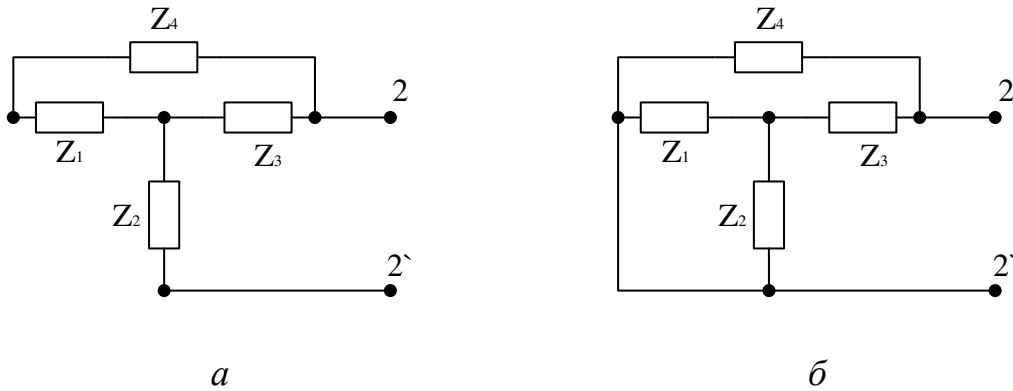


Рис. 3.5. Схемы несимметричного Т-образно мостового ЧП для обратной передачи в режимах:  
а – холостого хода; б – короткого замыкания

Разместим зажимы 2 и 2' слева и справа для лучшего восприятия полученных схем (рис. 3.6).

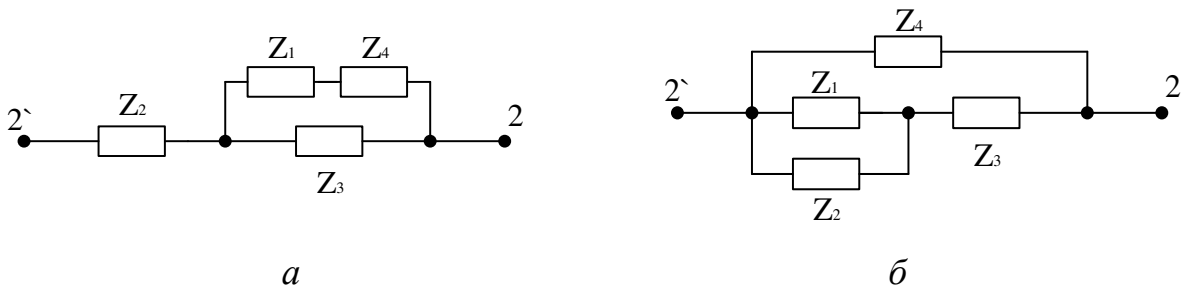


Рис. 3.6. Преобразованные схемы несимметричного Т-образно мостового ЧП для обратной передачи в режимах:  
а – холостого хода; б – короткого замыкания

По полученным схемам составляются выражения для расчета входных сопротивлений:

$$Z_{\text{вх2}}^{\infty} = Z_2 + \frac{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_4)}{Z_3 + Z_1 + Z_4}; \quad (3.9)$$

$$Z_{\text{вх}2}^0 = \frac{Z_4 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \right)}{Z_4 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3}. \quad (3.10)$$

Для дальнейшего расчета необходимо подставить в полученные выражения операторные сопротивления заданных ДП, упростить до вида (2.2) и затем рассчитать входные сопротивления, оформив результаты в виде сводной таблицы (табл. 3.1) и графиков частотных зависимостей (отдельно для прямой и обратной передачи сигнала).

Таблица 3.1

Расчет входных сопротивлений исследуемого ЧП в режимах холостого хода и короткого замыкания для прямой и обратной передачи

$\omega$ , рад/с	f, Гц	$Z_{\text{вх}1}^\infty$ , Ом	$Z_{\text{вх}1}^0$ , Ом	$Z_{\text{вх}2}^\infty$ , Ом	$Z_{\text{вх}2}^0$ , Ом
0	0				
.					
.					
.					
.					
.					
.					
$\infty$	$\infty$				

При построении графиков входных сопротивлений необходимо, как и при выполнении первого раздела, задаваться тремя значениями частоты в диапазонах между конечными ( $\omega = 0$  и  $\omega = \infty$ ) и резонансными частотами.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ МАТРИЦЫ ИССЛЕДУЕМОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

В курсовом проекте рассматривается ЧП, собранный из оптимально выбранных ДП в соответствии со схемой замещения, указанной в задании на курсовой проект. Схема замещения бывает Г-, Т-, П-образной, а также мостовой симметричной.

Теория ЧП позволяет, применяя некоторые обобщенные параметры, связать между собой напряжения и токи на входе и выходе, не производя расчетов этих величин в схеме самого ЧП. К таким обобщенным параметрам, в частности, относятся собственные параметры ЧП, которые определяются без учета влияния внешних подключений (генератора и нагрузки):

- 1) коэффициенты  $A, B, Z, Y, H, G$ ;
- 2) характеристические параметры  $Z_{c1}, Z_{c2}, g_c$ ;
- 3) повторные параметры  $Z_{п1}, Z_{п2}, g_{п}$ .

Имеются различные формулы связи собственных параметров между собой. Наиболее часто на практике используются параметры  $A$  и характеристические.

Четырехполюсную цепь (см. рис. 3.1), имеющую вход и выход, следует характеризовать связями между двумя напряжениями ( $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ ) и двумя токами ( $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ ). Эти связи представляют различным образом в зависимости от того, какие две из четырех величин заданы и какие две подлежат определению. При этом образуется система уравнений с двумя неизвестными. Такую систему уравнений для любых заданных условий включения ЧП можно дополнить еще двумя: уравнением генератора –  $\dot{E} = \dot{I}_1 Z_r + \dot{U}_1$  и уравнением приемника –  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_n$ .

Если за функции принять напряжение  $\dot{U}_1$  и ток  $\dot{I}_1$ , а за аргументы –  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$ , то получим основную систему уравнений ЧП,  $A$ -параметры которой чаще всего используются в теоретических расчетах:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}\dot{I}_2. \end{cases} \quad (4.1)$$

В матричной форме система (4.1) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = (A) \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Физический смысл и один из способов определения  $A$ -параметров следуют из опытов холостого хода (х. х) и короткого замыкания (к. з) ЧП.

При  $\dot{I}_2 = 0$  (х. х)

$$A_{11} = \frac{\dot{U}_{1\text{х. х}}}{\dot{U}_{2\text{х. х}}}; \quad (4.3)$$

$$A_{21} = \frac{\dot{I}_{1\text{х. х}}}{\dot{U}_{2\text{х. х}}}. \quad (4.4)$$

При  $\dot{U}_2 = 0$  (к. з)

$$A_{12} = \frac{\dot{U}_{1\text{к. з}}}{\dot{I}_{2\text{к. з}}}; \quad (4.5)$$

$$A_{22} = \frac{\dot{I}_{1\text{к. з}}}{\dot{I}_{2\text{к. з}}}. \quad (4.6)$$

В соответствии с выражениями (4.3) – (4.6):

- $A_{11}$  – коэффициент передачи по напряжению;
- $A_{12}$  – сопротивление передачи, Ом;
- $A_{21}$  – передаточная проводимость, См;
- $A_{22}$  – коэффициент передачи по току.

Для пассивных ЧП определитель, составленный из  $A$ -параметров, равен единице:

$$|A| = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1. \quad (4.7)$$

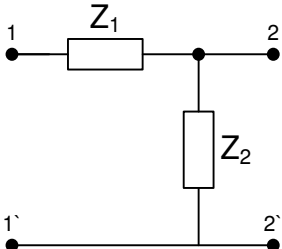
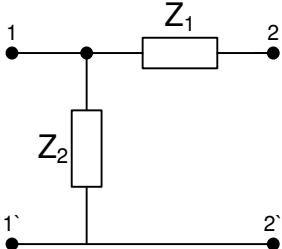
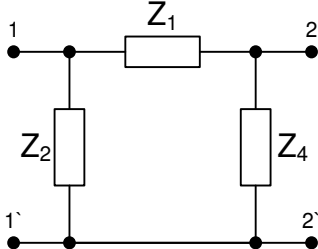
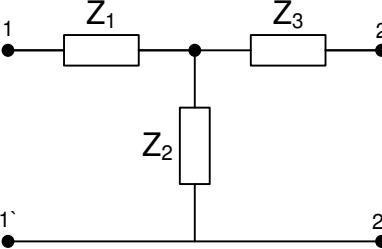
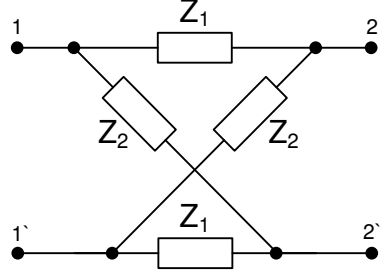
Только три параметра ЧП могут быть заданы независимо друг от друга, а четвертый определяется из уравнения связи (4.7). Если ЧП симметричный, то  $A_{11} = A_{22}$ , т. е. число независимых коэффициентов остается равным двум.

В курсовом проекте после выбора оптимальных схем ДП необходимо в соответствии с заданием составить одну из канонических схем ЧП, записать аналитические выражения для  $A$ -параметров и рассчитать их при одном значении частоты, проверив выполнение равенства (4.7) в общем виде и на рассчитанной частоте.

Выражения для расчета матрицы  $A$  канонических схем приведены в табл. 4.1. Для симметричной П-образной схемы следует принять  $Z_4 = Z_2$ , для симметричной Т-образной:  $Z_3 = Z_1$ .



Матрицы А канонических схем

Схема ЧП	Матрица (А)
	$\begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & Z_1 \\ \frac{1}{Z_2} & 1 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 1 & Z_1 \\ \frac{1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_4} & Z_1 \\ \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{Z_1}{Z_2 \cdot Z_4} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2} \\ \frac{1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_3}{Z_2} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2 - Z_1} & \frac{2 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 - Z_1} \\ \frac{2}{Z_2 - Z_1} & \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2 - Z_1} \end{pmatrix}$

## 5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ, ПОВТОРНЫХ И РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

### 5.1. Расчет характеристических параметров четырехполюсника

При исследовании работы ЧП в качестве различных устройств телекоммуникаций пользуются характеристическими параметрами  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ ,  $g_c$ , они зависят от схемы замещения ЧП и значений параметров его элементов, т. е. являются собственными.

#### 5.1.1. Характеристическое сопротивление

Характеристическое сопротивление – это такое входное сопротивление ЧП, при котором в качестве нагрузки используется другое характеристическое сопротивление (рис. 5.1).

Согласно определению характеристического сопротивления

$$Z_{\text{вх1}} = Z_{c1} = \frac{A_{11}Z_{c2} + A_{12}}{A_{21}Z_{c2} + A_{22}}; \quad (5.1)$$

$$Z_{\text{вх2}} = Z_{c2} = \frac{A_{22}Z_{c1} + A_{12}}{A_{21}Z_{c1} + A_{11}}. \quad (5.2)$$

Характеристическое сопротивление – это среднее геометрическое значений входных сопротивлений в режимах х. х и к. з, а также может быть выражено через  $A$ -параметры:

при прямом направлении передачи энергии

$$Z_{c1} = \sqrt{Z_{\text{х. х}} Z_{\text{к. з}}} = \sqrt{\frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}}; \quad (5.3)$$

при обратном –

$$Z_{c2} = \sqrt{Z'_{\text{х. х}} Z'_{\text{к. з}}} = \sqrt{\frac{A_{22}A_{12}}{A_{21}A_{11}}}. \quad (5.4)$$

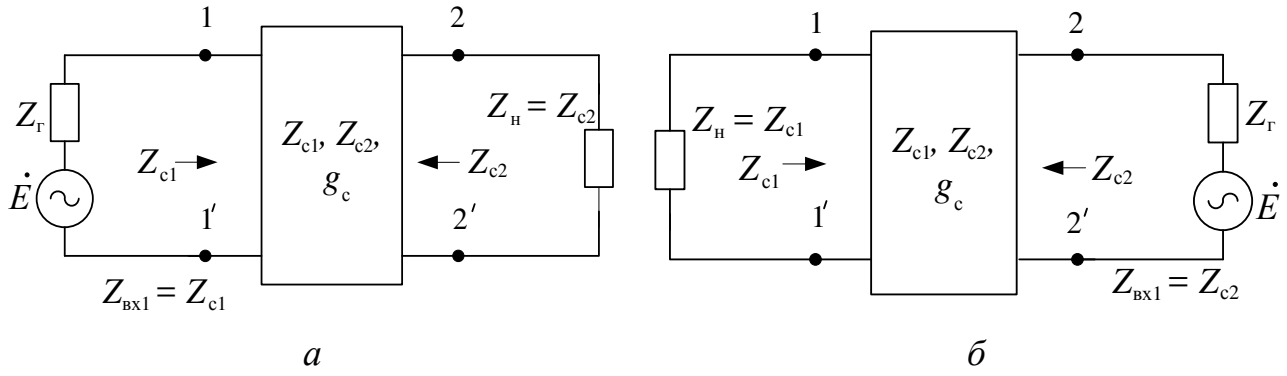


Рис. 5.1. Схемы к расчету характеристического сопротивления:  
*а* – прямое направление передачи энергии; *б* – обратное

### 5.1.2. Характеристическая постоянная передачи

Характеристическая постоянная передачи  $g_c$  оценивает изменение мощности при передаче через ЧП и не зависит от направления передачи:

$$g_c = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\dot{S}_1}{\dot{S}_2} \right|_{Z_H=Z_{c2}} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\dot{S}'_2}{\dot{S}'_1} \right|_{Z'_H=Z_{c1}} = \ln(\sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}}), \quad (5.5)$$

где  $g_c = a_c + jb_c$  – комплексная величина.

Вещественной частью параметра  $g_c$  является постоянная затухания  $a_c$ , Нп, которая показывает степень уменьшения мощности в ЧП или степень уменьшения амплитуды тока (напряжения) на выходе ЧП по сравнению с этими же величинами на его входе:

$$a_c = \ln \left| \sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}} \right|. \quad (5.6)$$

Мнимой частью параметра  $g_c$  является фазовая постоянная  $b_c$ , град, которая показывает смещение по фазе между токами (напряжениями) на входе и выходе ЧП:

$$b_c = \arg \left( \sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}} \right). \quad (5.7)$$

Зная выражения  $A$ -параметров ЧП и подставляя их в формулы (5.6) и (5.7), можно построить зависимости  $a_c(\omega)$  и  $b_c(\omega)$ .

Аналогичный результат дает расчет параметров  $a_c$ , дБ, и  $b_c$ , град, по формулам через входные сопротивления в режимах х. х и к. з.

Обозначив  $th(g_c) = x + jy = \sqrt{\frac{Z_{к.з}}{Z_{х.х}}} = \sqrt{\frac{Z'_{к.з}}{Z'_{х.х}}}$ , получим:

$$a_c = 10 \lg |\dot{N}|; \quad (5.8)$$

$$b_c = \frac{\varphi}{2}, \quad (5.9)$$

где  $\dot{N} = Ne^{j\varphi} = \frac{1 + (x + jy)}{1 - (x + jy)}$ .

При использовании выражений (5.8), (5.9) следует помнить о том, что гиперболический тангенс комплексного аргумента является многозначной функцией, поэтому к значению угла, вычисленному по формуле (5.9), следует прибавить  $180k$ , где  $k$  – целое число (0, 1, 2, ...). Значение  $k$  находят подбором, основываясь на дополнительных сведениях о схеме ЧП.

В этом разделе курсового проекта необходимо получить выражения для расчета сопротивлений  $Z_{c1}$  и  $Z_{c2}$  исследуемого ЧП по формулам (5.3) и (5.4) через значения входных сопротивлений в режимах х. х и к. з или через  $A$ -параметры  $a_c$  и  $b_c$  по формулам (5.6) и (5.7), рассчитать значения сопротивлений  $Z_{c1}$  и  $Z_{c2}$ , а также затухания  $a_c$  и фазовой постоянной  $b_c$ , оформив результаты в виде сводной таблицы, и построить графики их частотных зависимостей в том же диапазоне частот, что и для входных сопротивлений в режимах х. х и к. з.

## 5.2. Повторные параметры четырехполюсника

При включении несимметричных ЧП, особенно для коррекции амплитудных искажений, бывает целесообразно использовать повторные параметры  $Z_{п1}$ ,  $Z_{п2}$ ,  $g_{п}$ .

Повторным сопротивлением называется такое, при подключении которого в качестве нагрузки значение входного сопротивления ЧП становится равным значению нагрузочного.

При прямом направлении передачи повторное сопротивление

$$Z_{п1} = \frac{A_{11} - A_{22} + \sqrt{(A_{11} + A_{22})^2 - 4}}{2A_{21}}, \quad (5.10)$$

при обратном –

$$Z_{п2} = \frac{A_{22} - A_{11} + \sqrt{(A_{11} + A_{22})^2 - 4}}{2A_{21}}. \quad (5.11)$$

Повторная постоянная передачи характеризует соотношение между входными и выходными значениями тока, напряжения и мощности в режиме, при котором ЧП нагружен на соответствующее выбранному направлению передачи повторное сопротивление:

$$g_{п} = a_{п} + jb_{п} = \ln \left( \frac{A_{11} + A_{22}}{2} + \sqrt{\frac{(A_{11} + A_{22})^2}{4} - 1} \right). \quad (5.12)$$

В симметричных ЧП повторные параметры совпадают с характеристическими.

В данном разделе курсового проекта нужно выполнить расчет повторных параметров по формулам (5.10) – (5.12) на одной частоте ранее рассчитанных  $A$ -параметров.

### 5.3. Расчет рабочих параметров четырехполюсника

На практике трудно согласовать сопротивление  $Z_{н}$  с соответствующим сопротивлением  $Z_{с}$  ЧП во всей полосе передаваемых частот. Это вызывает дополнительные потери мощности, обусловленные отражениями сигнала на входе и выходе ЧП.

Таким образом, условия передачи мощности через ЧП не определяются только собственными параметрами ЧП, они зависят и от условий включения, характеристик передатчика и приемника энергии, подключенных к ЧП.

В рабочих условиях ЧП характеризуется так называемыми рабочими параметрами: входным сопротивлением  $Z_{вх}$ ; приведенным сопротивлением  $Z_{прив}$ ; сопротивлением передачи  $Z_{пер}$ ; рабочими передаточными функциями тока, напряжения, мощности; коэффициентами передачи тех же величин; рабочей

постоянной передачи  $g_p$ ; вносимой постоянной передачи  $g_{вн}$ ; передаточной функцией  $H(p)$ .

В основе измерения рабочих параметров ЧП лежит следующий принцип: эффект передачи мощности в действительной схеме включения ЧП между заданным генератором и приемником сравнивается с эффектом передачи мощности через стандартную систему, включенную между тем же генератором и приемником.

### 5.3.1. Входное сопротивление

Как уже было сказано выше, входным сопротивлением ЧП называется такое полное сопротивление ЧП переменному току, которое может быть измерено со стороны его входных зажимов при условии замыкания его выходных зажимов на заранее заданное сопротивление.

Входное сопротивление ЧП относится к числу его внешних (рабочих) параметров, зависит от направления передачи, нагрузки и собственных параметров.

Входное сопротивление как рабочий параметр в большей степени зависит от нагрузки и определяется по формулам (5.13), (5.14), если известны  $A$ -параметры ЧП.

При прямом направлении передачи (см. рис. 3.1, а)

$$Z_{вх1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{A_{11}Z_H + A_{12}}{A_{21}Z_H + A_{22}}; \quad (5.13)$$

при обратном (см. рис. 3.1, б) –

$$Z_{вх2} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} = \frac{A_{22}Z'_H + A_{12}}{A_{21}Z'_H + A_{11}}. \quad (5.14)$$

### 5.3.2. Сопротивление передачи и приведенное сопротивление

В практических условиях рассчитываемые ЧП обычно предназначаются для работы в заранее определенных условиях их включения, когда заданы генератор с ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $Z_r$  и приемник энергии с сопротивлением  $Z_H$ .

Если удастся определить ток  $\dot{I}_2$  через нагрузку, то эффект передачи мощности через ЧП будет известен. При этом используются такие рабочие параметры ЧП, как  $Z_{\text{пер}}$  и  $Z_{\text{прив}}$ .

Сопротивление передачи – это отношение входного напряжения к выходному току:

$$Z_{\text{пер1}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} = A_{11}Z_{\text{н}} + A_{12}; \quad (5.15)$$

$$Z_{\text{пер2}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}'_1} = A_{22}Z_{\text{н}} + A_{12}, \quad (5.16)$$

а приведенное сопротивление ЧП – отношение ЭДС генератора к току в нагрузке:

$$Z_{\text{прив1}} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_2} = A_{11}Z_{\text{н}} + A_{12} + Z_{\text{г}}(A_{21}Z_{\text{н}} + A_{22}); \quad (5.17)$$

$$Z_{\text{прив2}} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}'_1} = A_{11}Z_{\text{н}} + A_{12} + Z_{\text{г}}(A_{21}Z_{\text{н}} + A_{22}). \quad (5.18)$$

### 5.3.3. Рабочая и вносимая постоянные передачи

Для характеристики условий передачи мощности сигнала через ЧП используют логарифмическую меру рабочего коэффициента передачи по мощности ЧП – рабочую постоянную передачи (рис. 5.2):

$$\begin{aligned} g_p &= \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{S}_0}{\dot{S}_2} = \ln K_p = \ln \frac{Z_{\text{прив}}}{2\sqrt{Z_{\text{н}}Z_{\text{г}}}} = g_c + g_{\text{о.г}} + g_{\text{о.н}} + g_{\text{вз}} = \\ &= g_c + \ln \frac{Z_{\text{г}} + Z_{\text{с1}}}{2\sqrt{Z_{\text{г}}Z_{\text{с1}}}} + \ln \frac{Z_{\text{н}} + Z_{\text{с2}}}{2\sqrt{Z_{\text{н}}Z_{\text{с2}}}} + \ln(1 - \delta_{\text{н}}\delta_{\text{г}}e^{-2g_c}), \end{aligned} \quad (5.19)$$

где  $S_0$  – мощность, которую получает приемник от генератора при непосредственном подключении и при равенстве значений сопротивлений генератора и приемника;

$S_2$  – мощность, которую получает от того же генератора приемник с произвольным сопротивлением, включенным на выходе ЧП;

$K_p$  – рабочий коэффициент передачи по мощности;

$g_c$  – собственная постоянная передачи ЧП;

$g_{o. \Gamma}$  – постоянная передачи, обусловленная несогласованностью на входе ЧП;

$g_{o. H}$  – то же на нагрузке;

$g_{B3}$  – постоянная передачи, обусловленная взаимодействием несогласованности на входе и выходе ЧП;

$\delta_H = \frac{Z_H - Z_{c2}}{Z_H + Z_{c2}}$  – коэффициент несогласованности нагрузки с характеристическим сопротивлением  $Z_{c2}$  ЧП (на выходе);

$\delta_\Gamma = \frac{Z_\Gamma - Z_{c1}}{Z_\Gamma + Z_{c1}}$  – коэффициент несогласованности внутреннего сопротивления генератора с характеристическим сопротивлением  $Z_{c1}$  ЧП (на входе).

Практическое применение имеет рабочее затухание – вещественная часть  $g_p$ :

$$a_p = a_c + a_{o. \Gamma} + a_{o. H} + a_{B3}. \quad (5.20)$$

Рабочее затухание принято в качестве эксплуатационного измерителя и позволяет оценить существующие условия передачи энергии по сравнению с оптимальными условиями выделения мощности на нагрузке.

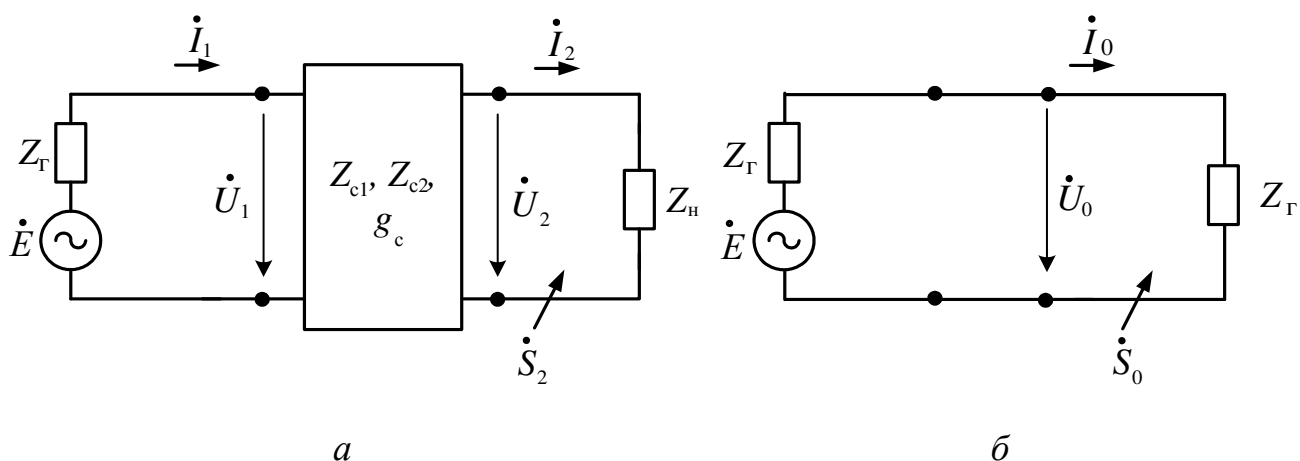


Рис. 5.2. Схемы для определения рабочей постоянной передачи  $g_p$

Вносимая постоянная передачи характеризует соотношение между мощностью  $S_H$ , отдаваемой генератором нагрузке, подключенной непосредственно к



его зажимам, и мощностью  $S_2$ , отдаваемой тем же генератором той же нагрузке, подключенной через ЧП (рис. 5.3):

$$g_{\text{вн}} = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{S}_H}{\dot{S}_2} = g_p - \ln \frac{Z_H + Z_\Gamma}{2\sqrt{Z_H Z_\Gamma}}. \quad (5.21)$$

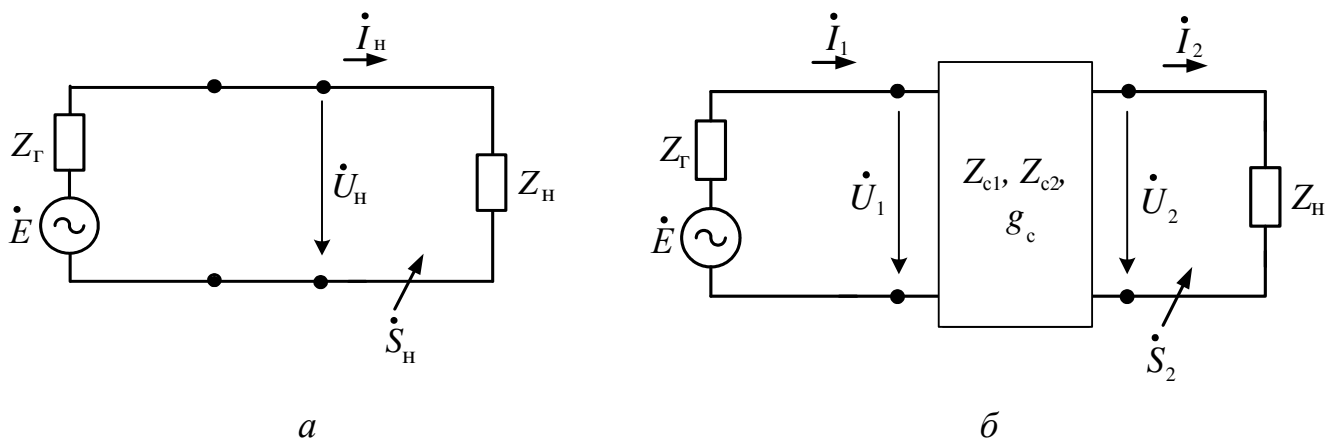


Рис. 5.3. Схемы для определения вносимой постоянной передачи  $g_{\text{вн}}$

Вносимая постоянная передачи  $g_{\text{вн}}$  отличается от рабочей постоянной  $g_p$  на величину, учитывающую разницу между значениями  $Z_H$  и  $Z_\Gamma$ , т. е. на величину несогласованности генератора с нагрузкой.

В курсовом проекте необходимо рассчитать рабочие параметры ЧП при заданных значениях  $Z_H$  и  $Z_\Gamma$  на одной частоте ранее рассчитанных  $A$ -параметров.

## 6. ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

При расчете электрических схем бывают случаи, когда в схеме можно изменить число входящих в нее элементов. При этом сохраняются все электрические свойства схемы, хотя структура и входящие в нее элементы полностью изменяются.

Условием эквивалентности ЧП является равенство их собственных параметров, например,  $(A^{(1)}) = (A^{(2)})$ , параметров  $x$ ,  $x$  и  $k$ ,  $z$ .

В курсовом проекте задается вид схемы замещения, синтезируемого ЧП. Необходимо рассчитать элементы эквивалентного пассивного ЧП, используя условие равенства соответствующих  $A$ -параметров исходного и эквивалентного четырехполусников. Для этого нужно составить систему уравнений исходя из

необходимого количества неизвестных сопротивлений ДП эквивалентной схемы. Решениями данной системы относительно известных (заданных) выражений сопротивлений ДП, входящих в состав исследуемого ЧП, будут выражения для неизвестных сопротивлений ДП эквивалентной схемы ЧП. Для полученных выражений сопротивлений ДП необходимо произвести синтез любой канонической схемы по алгоритму первого раздела курсового проекта.

Результатом выполнения данного раздела будет являться элементная схема рассчитанного эквивалентного ЧП.

Матрицы  $A$ -параметров схем замещения, наиболее часто применяемых ЧП, приведены в табл. 4.1.

Следует помнить о том, что для исходной симметричной схемы эквивалентной будет симметричная схема замещения, а для несимметричной исходной схемы – несимметричная эквивалентная.

## 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В соответствии с заданием на курсовой проект в лаборатории ТЛЭЦ производится проверка полученных частотных зависимостей некоторых параметров исследуемого ЧП.

Определение параметров ЧП производят методом моста переменного тока.

Экспериментальная установка (лабораторный макет) позволяет практически проверить расчетные теоретические зависимости характеристических сопротивлений  $Z_{c1}(\omega)$  и  $Z_{c2}(\omega)$ , собственного ослабления  $a_c(\omega)$  и фазового сдвига  $b_c(\omega)$ ; входного сопротивления ЧП  $Z_{вх}(\omega)$ ; рабочего ослабления  $a_p(\omega)$ ; повторных сопротивлений  $Z_{п1}$  и  $Z_{п2}$ , повторного ослабления  $a_{п}$  и фазовой постоянной  $b_{п}$  от частоты и т. д.

По результатам эксперимента, которые необходимо представить в табличной форме, построить графики измеренной величины в зависимости от частоты. Сравнить соответствующие результаты теоретического расчета с результатами, полученными экспериментально.

## 8. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Варианты задания на курсовой проект представлены в табл. 8.1. Номер варианта задается преподавателем.

Содержание проекта:

1) синтез схем реактивных ДП, входящих в состав исследуемого ЧП (выявление необходимых и достаточных условий для физической реализации ДП, определение класса и расчет резонансных частот, составление и расчет всех канонических схем синтезируемых ДП разложения на простые и непрерывные дроби, составление сводной таблицы частотных зависимостей сопротивлений ДП и построение по ней графиков);

2) расчет входных сопротивлений ЧП в режимах х. х и к. з (составление элементной схемы исследуемого ЧП, составление схем исследуемого ЧП в режимах х. х и к. з для прямой и обратной передачи, вывод выражений для расчета входных сопротивлений через сопротивления исходных ДП, составление сводной таблицы частотных зависимостей входных сопротивлений ЧП и построение по ней графиков для прямой и обратной передачи);

3) определение основной матрицы типа  $A$  исследуемого ЧП (расчет выполняется на одной частоте);

4) расчет характеристических, повторных и рабочих параметров ЧП (расчет характеристических параметров исследуемого ЧП, составление сводной таблицы частотных зависимостей характеристических параметров ЧП и построение по ней графиков, повторные и рабочие параметры рассчитываются на одной частоте);

5) экспериментальная проверка результатов теоретических расчетов;

6) расчет элементов эквивалентного пассивного ЧП и построение его элементной схемы.

### Библиографический список

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г. И. Атабеков. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – Текст : непосредственный.

2. Волков, Е. А. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Е. А. Волков. – Москва : Маршрут, 2005. – Текст : непосредственный.

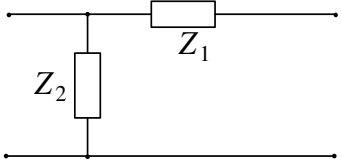
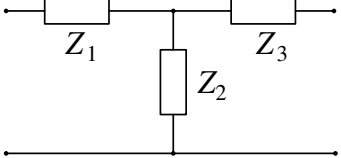
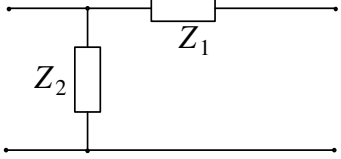
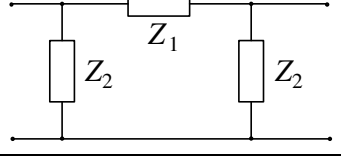
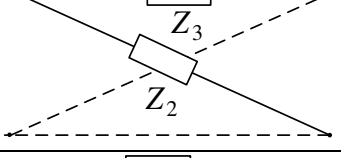
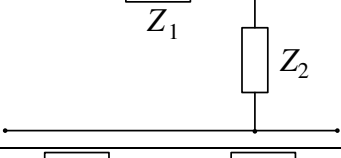
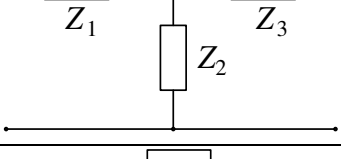
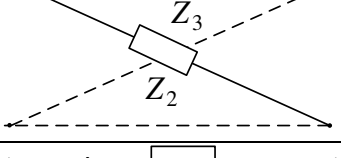
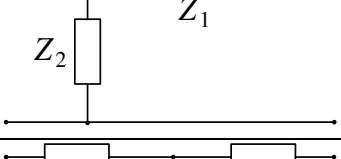
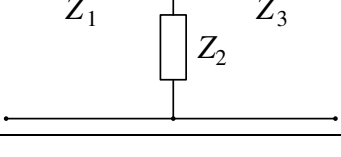
3. Карпова, Л. А. Расчет характеристик двухполюсников и четырехполюсников : методические указания к выполнению курсовой работы для студентов ИАТИТа / Л. А. Карпова, О. Н. Коваленко. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2006. – Текст : непосредственный.

Таблица 8.1

## Задания на курсовой проект

Номер варианта	Формула для расчета сопротивления ДП			Схема исследуемого ЧП
	Z1	Z2	Z3	
1	2	3	4	5
1	$\frac{10^7(1+5 \cdot 10^{-9} p^2)}{2p(1+4,5 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{10^7 p}{10^9 + 3p^2}$	$\frac{10^7}{2p}$	
2	$\frac{10^9 + 9p^2}{500p}$	$\frac{0,025p + 4,5 \cdot 10^{-11} p^3}{1 + 5,5 \cdot 10^{-9} p^2}$	$0,035p$	
3	$\frac{0,04p(1+4,2 \cdot 10^{-9} p^2)}{1 + 3,8 \cdot 10^{-8} p^2}$	$\frac{9 \cdot 10^9 p}{10^{11} + 250p^2}$	$0,04p$	
4	$\frac{9 \cdot 10^9 p}{10^{10} + 325p^2}$	$\frac{0,05p(8 \cdot 10^8 + p^2)}{5 \cdot 10^8 + p^2}$	$\frac{4}{10^{-7} p}$	
5	$\frac{10^{10} + 9p^2}{520p}$	$\frac{0,015p(1+5 \cdot 10^{-10} p^2)}{1 + 10^{-9} p^2}$	$\frac{10^7}{7p}$	
6	$\frac{0,06p(1+10^{-9} p^2)}{1 + 2 \cdot 10^{-9} p^2}$	$\frac{8 \cdot 10^9 p}{10^{11} + 50p^2}$	$0,02p$	
7	$\frac{5 \cdot 10^7 p}{10^9 + 25p^2}$	$\frac{0,07p(1+2 \cdot 10^{-9} p^2)}{1 + 4 \cdot 10^{-9} p^2}$	$0,06p$	
8	$\frac{0,05p(1+9 \cdot 10^{-10} p^2)}{1 + 5 \cdot 10^{-9} p^2}$	$\frac{10^9 + 5p^2}{100p}$	$\frac{10^7}{3p}$	
9	$\frac{1+1,5 \cdot 10^{-9} p^2}{3 \cdot 10^{-7} p}$	$\frac{0,03p(1+5 \cdot 10^{-10} p^2)}{1 + 10^{-9} p^2}$	$\frac{1,5}{10^{-7} p}$	
10	$\frac{0,03p(1+10^{-9} p^2)}{1 + 6 \cdot 10^{-9} p^2}$	$\frac{10^7 + 0,02p^2}{4p}$	$\frac{4}{10^{-7} p}$	

Окончание табл. 8.1

1	2	3	4	5
11	$\frac{50 \cdot 10^6 p}{10^9 + 5p^2}$	$\frac{10^7(1 + 3 \cdot 10^{-9} p^2)}{5p(1 + 4,8 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$0,025p$	
12	$\frac{10^7(1 + 2,7 \cdot 10^{-9} p^2)}{4p(1 + 9 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{0,07p}{1 + 9 \cdot 10^{-9} p^2}$	$\frac{5}{10^{-7} p}$	
13	$\frac{10^7(1 + 2 \cdot 10^{-9} p^2)}{2p(1 + 5 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{0,042p}{1 + 10^{-9} p^2}$	$0,045p$	
14	$\frac{0,065p}{1 + 10^{-8} p^2}$	$\frac{10^7(1 + 4,5 \cdot 10^{-9} p^2)}{2p(1 + 6 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{6}{10^{-7} p}$	
15	$\frac{10^7(1 + 3 \cdot 10^{-9} p^2)}{p(1 + 7,5 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{10^9 + p^2}{15p}$	$\frac{2,5}{10^{-7} p}$	
16	$\frac{10^8 p}{35(10^9 + p^2)}$	$\frac{10^7(1 + 1 \cdot 10^{-9} p^2)}{8p(1 + 6 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$0,015p$	
17	$\frac{10^7(1 + 5 \cdot 10^{-9} p^2)}{3p(1 + 7,5 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{45 \cdot 10^7 p}{10^{10} + 18p^2}$	$0,032p$	
18	$\frac{10^8 + 2p^2}{330p}$	$\frac{10^7(1 + 7 \cdot 10^{-9} p^2)}{7p(1 + 8,8 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{3,5}{10^{-7} p}$	
19	$\frac{10^7(1 + 3 \cdot 10^{-9} p^2)}{4,5p(1 + 4 \cdot 10^{-10} p^2)}$	$\frac{9 \cdot 10^9 p}{10^{11} + 425p^2}$	$0,05p$	
20	$\frac{0,05p(1 + 5 \cdot 10^{-10} p^2)}{1 + 2 \cdot 10^{-9} p^2}$	$\frac{10^7 + 0,02p^2}{6p}$	$0,045p$	

*Учебное издание*

ФЕДОТОВ Дмитрий Анатольевич,  
ЧЕРНОУСОВА Виктория Степановна

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ  
«ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

---

Редактор Н. А. Майорова

\*\*\*

Подписано в печать 23.11.2022. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ .  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,4. Уч.-изд. л. 2,7.  
Тираж 30 экз. Заказ .

\*\*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35