

## 1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

### 1.1. Общие указания

Главная цель курсового проектирования - научить студента использовать теоретические положения, усвоенные им в ходе изучения курса, для решения задач, выдвигаемых инженерной практикой. Курсовое проектирование - важный этап в подготовке студента к сознательному, творческому выполнению дипломного проекта.

### 1.2. Выбор варианта

Исходные данные для расчета выбираются по табл. 1, в которой  $d$  - диаметр жил симметричной пары кабеля, мм;  $l$  - длина соединительной линии, км. Рабочая полоса частот и неравномерность частотной характеристики затухания должны соответствовать нормам первого класса качества ГОСТ 11515-75 (см. табл. 2). Вторичные параметры симметричной пары приведены ниже (см. 1.7. Параметры кабелей, используемых в качестве соединительных линий).

Таблица 1

d = 0.8 мм		d = 0.8 мм		d = 0.7 мм		d = 0.6 мм		d = 0.5 мм	
n	l	n	l	n	l	n	l	n	l
00	20	10	5.5	20	10	30	5	40	10
01	11	11	6.5	21	11	31	6	41	11
02	12	12	7.5	22	12	32	7	42	12
03	13	13	8.5	23	13	33	8	43	13
04	14	14	9.5	24	14	34	9	44	4
05	15	15	10.5	25	5	35	10	45	5
06	16	16	11.5	26	6	36	11	46	6
07	17	17	12.5	27	7	37	12	47	7
08	18	18	13.5	28	8	38	13	48	8
09	19	19	14.5	29	9	39	14	49	9

### 1.3. Оформление работы

Оформление работы должно удовлетворять действующим стандартам. При оформлении работы можно воспользоваться соответствующими методическими указаниями для оформления дипломных проектов, имеющимися на сайте БГУИР (см. раздел УМО). В рукописи работы должны быть титульный лист, исходные данные на проектирование, содержание (оглавление), разделы проекта, заключение, список использованной литературы. На титульном листе указываются название вуза и кафедры (можно сокращенно), тема работы, фамилия и инициалы исполнителя, номер группы и студенческого билета, год. Текст пишется на одной стороне листа писчей бумаги размерами примерно 200х300 мм.

Пояснения к расчетам должны быть написаны технически правильным языком, с соблюдением действующих правил орфографии и пунктуации. Знаками препинания следует снабжать и математические выкладки, а также описание литературных источников в списке литературы.

Заголовки содержания (оглавления) должны точно повторять заголовки частей текста. Их нельзя сокращать или давать в другой формулировке и последовательности. Содержание (оглавление) помещают после титульного листа.

Схемы и графики вычерчивают с соблюдением действующих стандартов. Перед порядковым номером иллюстрации пишут сокращенное слово "рис.". Точки в конце заголовков и подписей к иллюстрациям не ставят.

**Не допускается искусственное увеличение объема проекта путем прямого переписывания текста из учебных пособий и руководств.**

**В конце работы должна стоять дата завершения работы и подпись.**

Выбору параметров и расчетам величин элементов должны предшествовать краткие обоснования. Рассчитанные величины должны содержать количество значащих цифр, соответствующее точности исходных величин и требованиям практики.

### 1.4. Рекомендуемая литература

1. Радиовещание и электроакустика: Учебник для вузов / С. Н. Алябьев, А. В. Выходец, Р. Гермер и др.; ред. Ю. А. Ковалгина. - М.: и связь, 2002.-798с.

2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов / И. А. Алдошина, Э. И. Вологдин, А. П. Ефимов и др.; Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.

3. Радиовещание и электроакустика: Учебник для вузов / А. В. Выходец, М. В. Гитлиц, Ю. А. Ковалгин и др. ; Под ред. М. В. Гитлица. - М.: Радио и связь, 1989. - 432 с.

4. Гензель Г.С., Ковалгин Ю.А. Основы техники звукового вещания. Часть 1. Принципы построения и линии систем звукового вещания. - Л.: ЛЭИС, 1975, с. 112-121.
5. Глухов А.А. Основы звукового вещания. - М.: Связь, 1977, с. 67-70. 311-325.
6. Горон И.Е. Радиовещание. - М.: Связь, 1979, с. 214-220.
7. Горон И.Е. Корректирование амплитудно-частотных искажений. - М.: Связьиздат, 1963. - 56 с.
8. ГОСТ 11515-75. Каналы и тракты звукового вещания. Основные параметры качества. - М.: Издательство стандартов, 1976, с. 8, табл. 3.
9. Ефимов А.П. Радиовещание. - М.: Связь, 1975, с. 68-71, 160-163, 174-175, 198-212, 226-227, 289-291.
10. Ефимов А.П. Соединительные линии и их коррекция. - М.: ВЗЭИС, 1968. - 40 с.
11. Папернов Л.З., Голубчик А.С. Передача программ проводного вещания по линиям городских телефонных сетей. - М.: Связьиздат, 1963. - 72 с.
12. Техника проводного вещания и звукоусиления / Под ред. В.Б. Булгака и А.П. Ефимова. - М.: Радио и связь, 1985, с. 100-114.

### 1.5. Объем проектирования

1. Составить структурную схему соединительной линии (СЛ); показать на ней места включения линейного усилителя (ЛУ), линейно-разделительного устройства (ЛРУ), линейных трансформаторов (ЛТ), корректирующего (выравнивающего) контура (КК).
2. Рассчитать затухание СЛ на нескольких частотах в пределах заданного диапазона частот.
3. Выбрать схему и рассчитать параметры элементов КК, рассчитать затухание КК на нескольких частотах.
4. Построить частотные характеристики затухания СЛ и КК.
5. Рассчитать номинальные значения уровня сигнала на входе и выходе СЛ и КК на граничных частотах заданного диапазона частот и на частоте 1 кГц.
6. Рассчитать номинальную мощность, потребляемую СЛ от ЛУ на частоте 1 кГц.
7. Проанализировать результаты расчета и сравнить их с нормами, при необходимости ввести в схему СЛ промежуточный усилитель.

## 1.6. Содержание работы

Законченная курсовая работа должна содержать:

1. Перечень исходных данных для проектирования.
  2. Краткое описание назначения СЛ, принципов корректирования амплитудно-частотных искажений, действия ЛРУ, защитных устройств, способов уменьшения влияния внешних помех.
  3. Обоснования места включения КК, защитных устройств, параметров защитных устройств.
  4. Расчеты затухания СЛ и КК и параметров элементов КК.
  5. Расчеты номинальных уровней на входе и выходе СЛ и КК.
  6. Расчет номинальной мощности, отбираемой СЛ от ЛУ.
  7. Заключение.
  8. Список использованной литературы.
- В графический материал должны входить:
1. Структурная схема СЛ с устройствами, перечисленными в п. 1 задания.
  2. Принципиальная схема КК.
  3. Частотные характеристики затухания СЛ и КК и их общая (суммарная) частотная характеристика.
  4. Диаграммы уровней СЛ для частот 0,05, 1 и 10 кГц.

## 1.7. Параметры кабелей, используемых в качестве соединительных линий.

f, кГц	$\alpha$ , Нп/км	$\beta$ , рад/км	$ z_B $ , Ом	$-\varphi^\circ$	$ z_B \cos\varphi$ , Ом	$ z_B \sin\varphi$ , Ом
Диаметр жилы d = 0.5 мм, R = 190 Ом/км, C = 0.04 мкФ/км						
0.05	0.035	0.035	3890	45	2760	2745
0.1	0.049	0.049	2748	45	1915	1934
0.3	0.085	0.085	1587	44	1125	1120
1	0.154	0.156	870	44	620	610
3	0.261	0.275	502	43	367	345
10	0.441	0.537	277	39	214	176
Диаметр жилы d = 0.6 мм, R = 132 Ом/км, C = 0.041 мкФ/км						
0.05	0.029	0.029	3197	45	2265	2255

0.1	0.042	0.041	2260	45	1607	1593
0.3	0.070	0.071	1300	44	922	914
1	0.128	0.135	714	44	510	506
3	0.216	0.235	412	42	304	279
10	0.357	0.475	231	37	125	139
Диаметр жилы $d = 0.7$ мм, $R = 96$ Ом/км, $C = 0.042$ мкФ/км						
0.05	0.025	0.025	2698	45	1915	1900
0.1	0.036	0.036	1904	45	1352	1340
0.3	0.060	0.061	1100	44	772	764
1	0.107	0.113	603	43	430	413
3	0.184	0.206	349	41	261	232
10	0.294	0.442	197	34	163	111
Диаметр жилы $d = 0.8$ мм, $R = 72.2$ Ом/км, $C = 0.033$ мкФ/км						
0.05	0.019	0.019	2640	45	1840	1860
0.1	0.027	0.029	1864	45	1325	1310
0.3	0.046	0.05	1051	44	754	738
1	0.082	0.087	578	43	424	396
3	0.133	0.151	340	39	262	217
10	0.202	0.36	200	29	175	97

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ

### 2.1. Назначение соединительной линии

Соединительные линии (СЛ) связывают между собой различные территориально разобщённые вещательные аппаратные. Они служат для передачи электрических сигналов вещательных программ из одной аппаратной в другую, на радиовещательную станцию (РВС), а также для контроля и дистанционного управления. Иногда по СЛ осуществляют также дистанционное питание необслуживаемых устройств и служебную телефонную связь.

Соединительные линии связывают трансляционные пункты (ТП), находящиеся в зрелищных предприятиях (в театрах и концертных залах) и в спортивных комплексах (на стадионах, в спортивных залах), с трансляционной (ТА) или центральной аппаратной (ЦА)

радиодома (РД); ЦА РД с коммутационно-распределительной аппаратной (КРА); КРА с междугородной вещательной аппаратной (МВА) междугородной телефонной станции (МТС), передающим радиоцентром (РЦ) и центральной станцией (ЦС) местного узла проводного вещания (УПВ); ЦС ПВ с усилительными станциями проводного вещания (УС, ОУС, УПС) и т.д. При небольшом количестве потребителей КРА совмещают с ЦА РД.

В качестве СЛ чаще всего используют на условиях аренды пары городских телефонных кабелей. Поэтому каждая СЛ проходит через кроссировочные стойки (щиты переключений) городских телефонных станций (ГТС) и состоит по крайней мере из двух участков: от одной вещательной аппаратной до ГТС и от ГТС до другой вещательной аппаратной. На участках ЦС УПВ-ОУС (УПС) применяют пары телефонного кабеля с диаметром жил 0,5 и 0,7 мм. На участках КРА-РЦ, имеющих большую протяженность, используют пупинизированные кабели с диаметром жил 1,2 и 1,4 мм (пупинизация позволяет в ряде случаев обойтись без частотной коррекции), кабели ТЗЭГ с диаметром жил 0,9 мм, ТДСГ с экранированными парами с диаметром жил 1,4 мм. На участках ТП-ЦА и ЦА РД-КРА в зависимости от местных условий используют либо пары специально проложенного вещательного кабеля, либо пары телефонного кабеля. Воздушные линии связи для организации вещательных СЛ не используют ввиду их меньшей надежности и худших параметров качества.

Для передачи сигналов вещательной программы из передвижных ТП применяют радиолинии дециметрового диапазона радиоволн.

## 2.2. Параметры качества соединительной линии

Основные параметры качества СЛ: номинальный диапазон частот, неравномерность амплитудно-частотной характеристики, коэффициент гармоник, защищенность от помех.

Под номинальным диапазоном частот понимают полосу частот от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ , в пределах которой неравномерность АЧХ не превышает заданной величины. Неравномерность АЧХ оценивают либо изменениями коэффициента передачи  $K$  относительно коэффициента

передачи  $K_0$  на частоте 1 кГц:  $M = 20 \cdot \lg \left( \frac{K}{K_0} \right)$ ; либо изменениями затухания СЛ в полосе

частот от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ :  $a = a_{\max} - a_{\min}$ . Очевидно, что первые два параметра тесно связаны между собою и не могут нормироваться отдельно.

Коэффициент гармоник служит мерой нелинейных искажений. Коэффициент гармоник равен отношению эффективного напряжения всех гармоник к эффективному напряжению измерительного синусоидального сигнала на выходе контролируемого канала (звена):

$$K_{\text{г}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^m P_n}{\sum_{n=1}^m P_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^m U_n^2}{\sum_{n=1}^m U_n^2}} \approx \frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots}{U_1^2},$$

где  $n$  - номера гармонических составляющих;

$m$  - номер наивысшей измеряемой гармоники;

$P_n$  и  $U_n$  - соответственно мощность и напряжение гармоники с номером  $n$ .

Соединительные линии с проводами из неферромагнитного материала, используемые в диапазоне звуковых частот, и корректирующие контуры, катушки индуктивности которых не имеют ферромагнитных сердечников, являются линейными электрическими цепями. Они не вносят нелинейных искажений.

Линейные трансформаторы (ЛТ), включенные на входе и выходе СЛ, в силу формы своей амплитудной характеристики, повторяющей кривую намагничивания, создают нелинейные искажения как при больших, так и при малых уровнях сигнала. Этой особенностью обладают и катушки индуктивности корректирующих контуров (КК) с ферромагнитными сердечниками. Уменьшения возникающих в этих элементах нелинейных искажений до приемлемой величины достигают конструктивными мерами и выбором уровней сигнала.

Источником нелинейных искажений являются также промежуточные усилители (ПУ). При нормировании коэффициента гармоник ПУ необходимо учитывать особенности корректирования АЧХ СЛ. Например, если АЧХ участка СЛ, следующего после ПУ, исправляют КК, включенным до ПУ, то наибольшая величина  $K_{\text{г}}$  ПУ может сместиться в область высших звуковых частот.

Особое положение складывается при передаче по СЛ вещательных сигналов при помощи модулированных по амплитуде токов высокой частоты. Различие затухания СЛ в области нижней и верхней боковых полос модуляции и наличие фазочастотных искажений в этой области вызывают асимметрию спектра АМ колебания, а это, в свою очередь, вызывает

нелинейные искажения при последующем детектировании. При таком использовании СЛ нужно нормировать величину  $K_2$ .

Влияние помех оценивают с помощью понятия "защищенность":

$$A = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_c}{P_n}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_c}{U_n}\right),$$

где  $P_c$  - номинальная мощность сигнала;

$U_c$  - номинальное действующее значение напряжения сигнала на частоте 1 кГц;

$P_n$  - мощность помехи;

$U_n$  - действующее значение напряжения помехи.

Различают интегральную помеху, когда напряжение помех измеряют вольтметром с квадратичной характеристикой, и психофотметрический шум, когда напряжение помех измеряют психофотметром - вольтметром с нормированными параметрами зарядно-разрядной цепи и взвешивающим фильтром, учитывающим различную чувствительность слуха к звукам разных частот. Для оценки влияния переходных помех, наводимых из одного канала в другой, пользуются понятием защищенности от внятной переходной помехи. Требуемая защищенность определяется уровнем помех в канале.

Норма на уровень помех в СЛ устанавливается с учетом помех, обусловленных линейными переходами от соседних пар кабеля, и помех от систем уплотнения СЛ, служащих для дистанционного управления и контроля, а также с учетом уровня вещательного сигнала, передаваемого по СЛ. В свою очередь, норма на уровень вещательного сигнала обусловлена применяемым способом корректирования АЧХ и допустимой величиной помехи от СЛ другим парам кабеля. Все нормы на параметры качества СЛ взаимосвязаны, поэтому их устанавливают совместно, комплексно.

Не все пары кабелей ГГС пригодны для передачи вещательных сигналов, поскольку обладают недостаточным переходным затуханием. Для организации вещательных СЛ выбирают те пары кабелей ГГС, которые обладают наибольшей величиной переходного затухания по отношению к соседним парам и наименьшей величиной асимметрии.

Нормы параметров качества СЛ в соответствии с ГОСТ 11515-75 приведены в табл. 2.



Таблица 2. Нормы параметров качества соединительных линий  
звукового вещания

Параметры качества		Классы качества		
		Высший	Первый	Второй
Номинальный диапазон частот		30 - 15000	50 - 10000	100 - 6300
Допускаемые отклонения АЧХ, дБ, не более	в области частот от $f_{\min}$ до $1.5f_{\min}$ и от $0.66f_{\max}$ до $f_{\max}$ от $1.5f_{\min}$ до $0.66f_{\max}$	$\begin{cases} +0.5 \\ -1.0 \end{cases}$ -0.5	$\begin{cases} +1.0 \\ -2.0 \end{cases}$ $\pm 1.0$	$\begin{cases} +1.0 \\ -2.0 \end{cases}$ $\pm 1.0$
Коэффициент гармоник, %, не более	на частотах до 100 Гц включительно	1.0	1.0	-
	свыше 100 до 200 Гц включительно	0.5	0.5	1.0
	свыше 200 Гц	0.5	0.5	0.5
Защищённость от интегральной помехи, дБ		66	60	57
Защищённость от психометрического шума, дБ		64	60	57
Защищённость от внятной переходной помехи, дБ		74	70	60

### 2.3. Номинальные уровни вещательного сигнала в соединительной линии

Уровень вещательного сигнала, передаваемого по СЛ, сам по себе не является параметром качества. Но от его величины зависит и отношение сигнал-помеха (С/П) в СЛ, и величина уровня переходной помехи в соседних парах кабеля.

Величины номинальных уровней сигнала на входе и выходе СЛ установлены документом "Электрические нормы на тракты звукового вещания сетей проводного вещания" (Радио и связь, 1982). Номинальный уровень вещательного сигнала в конце скорректированной СЛ должен быть не менее 0 дБ на нагрузке 600 Ом. Уменьшать уровень ниже этой величины нельзя потому, что иначе придется предъявлять более жесткие требования к уровню собственных помех и фона усилителя, включенного к выходу СЛ.

Максимальная величина уровня вещательного сигнала на входе СЛ определяется допустимыми помехами от вещательной СЛ другим парам кабеля. Для вещательных СЛ отбирают пары с переходным затуханием порядка 80 дБ. При этом номинальный уровень вещательного сигнала в начале СЛ возможно установить равным +17 дБ (+2 Нп, 5,5 В).

Если затухание СЛ на высшей частоте не превышает 17 дБ, КК можно включать в конце или в начале СЛ. При этом длина однородной СЛ с диаметром жил 0,5 мм и сопротивлением нагрузки 600 Ом при полосе частот до 10 кГц ограничивается 5-6 км.

Если затухание СЛ на частоте 3 кГц составляет от 17 до 23 дБ, КК рекомендуется включать в начале СЛ. При этом допустимая длина СЛ с указанными выше параметрами возрастает до 10-12 км.

Если затухание СЛ на частоте 3 кГц превышает 23 дБ, рекомендуется устанавливать на АТС промежуточные усилители. Если установить ПУ невозможно, то по согласованию с ГТС можно повышать номинальный уровень на входе СЛ, начиная с частоты 3 кГц, свыше +17 дБ. На частотах выше 10 кГц уровень напряжения не должен быть более +30 дБ (+3,5 Нп, 24,5 В).

Увеличивать номинальные уровни вещательного сигнала в области верхних частот можно ввиду особенностей спектров вещательных сигналов. На частотах выше 1,5-3 кГц реальные максимальные уровни вещательных сигналов обычно меньше, чем на средних частотах. К тому же длительность сигналов большого уровня на верхних частотах меньше, чем на средних. Номинальный уровень на входе СЛ на частоте 3 кГц может достигать +23 дБ, а на более высоких частотах его величина определяется потребностями частотной коррекции и ограничивается лишь мощностью ЛУ. Однако если по соседним парам телефонного кабеля передают электрические сигналы других вещательных программ, то могут появиться взаимные помехи. По этой причине номинальный уровень на высшей частоте рабочего диапазона ограничили величиной 30 дБ.

Исходя из действующих норм, допускают максимальное затухание СЛ вместе с КК (если он включен после СЛ) на частоте 1 кГц 17 дБ. Если номинальный уровень сигнала в конце СЛ превышает 0 дБ, его доводят до номинального установочным регулятором уровня (удлинителем) УР. Место его включения показано на схеме рис. 12.

## **2.4. Выбор сопротивления нагрузки**

Номинальное входное сопротивление вещательной аппаратуры обычно принимают равным 600 Ом. Такая величина сопротивления нагрузки сложилась исторически. На

начальном этапе развития телефонной связи применяли воздушные линии с медными (точнее, бронзовыми - для повышения механической прочности) проводами. Модуль волнового сопротивления таких линий в диапазоне звуковых частот изменяется в очень больших пределах (от нескольких тысяч на низших частотах до нескольких сот ом на высших частотах). На средних звуковых частотах он близок к шестистам омам, а угол волнового сопротивления составляет несколько градусов (менее  $10^\circ$ ), и им можно пренебречь. Чтобы нагрузка отбирала из линии наибольшую мощность, режим линии стремились приблизить к согласованному, т.е. принимали  $R_n \approx |z_g| = 600 \text{ Ом}$ .

К настоящему времени воздушные телефонные линии уступили место подземным кабельным. Модуль их волнового сопротивления иной, обычно значительно меньше.

## 2.5. Особенности расчета затухания СЛ

Как указывалось выше, СЛ может состоять из нескольких отрезков пар кабелей разного типа. Учитывая учебный характер курсового проекта, для упрощения расчета принимаем, что СЛ является однородной. В этом случае ее затухание рассчитывают по известной формуле:

$$a_n = 20 \cdot \lg \left| \operatorname{ch}(gl) + \frac{z_g}{R_n} \cdot \operatorname{sh}(gl) \right| \quad (1)$$

где  $g = a + ib$  - коэффициент распространения, 1/км;

$l$  - длина линии, км;

$z_g = |z_g| \cdot e^{ij}$  - волновое сопротивление линии, Ом;

$R_n$  - сопротивление нагрузки, Ом.

Соединительные линии, предоставляемые телефонной сетью вещательным организациям, обычно неоднородны, состоят из участков, отличающихся диаметром жил и конструкцией кабеля. В эксплуатационных условиях трудно получить точные данные об отдельных участках СЛ. К тому же расчет составной СЛ сложен. В этих случаях пользуются усредненными характеристиками затухания составных СЛ.

Коэффициент распространения и волновое сопротивление связаны с первичными параметрами линии - сопротивлением проводов на километр длины  $Z$  (Ом/км) и проводимостью изоляции между проводами  $Y$  (См/км) – соотношениями

$$g = \sqrt{Z \cdot Y}; \quad (2)$$

$$z_g = \sqrt{\frac{Z}{Y}}; \quad (3)$$

Для уменьшения затрат времени на расчеты рекомендуется величины  $ch(gl)$  и  $sh(gl)$  брать из таблиц, имеющих в справочной литературе. Ввиду ограниченной точности расчетов можно не прибегать к интерполяции, а брать из таблиц ближайшую величину  $ch(gl)$  и  $sh(gl)$ . Объем расчетов можно значительно уменьшить, используя приближенные значения  $ch(gl)$  и  $sh(gl)$  при малых и больших величинах модуля  $gl$ .

1. При  $|gl| \ll 1$  (практически, если  $|gl| \leq 0.5$ )

$$sh(gl) \approx gl = \sqrt{ZYl}, \quad \frac{z_g}{R_n} \cdot sh(gl) = \frac{z_l}{R_n} = \frac{z_n}{R_n}; \quad (4)$$

$$a_n = 20 \cdot lg \left| 1 + \frac{z_n}{R_n} \right|.$$

Более того, на низших частотах (от нескольких десятков до нескольких сот герц)  $z_n = Zl \approx Rl$ , тогда

$$a_n = 20 \cdot lg \left| 1 + \frac{Rl}{R_n} \right|. \quad (5)$$

2. При  $|gl| \gg 1$  (практически, если  $|gl| \geq 2$ )

$$sh(gl) \approx ch(gl) = \frac{1}{2} e^{gl}$$

и

$$a_n = 8.7 \cdot a \cdot l + 20 \cdot \lg \left| 1 + \frac{z_{\text{с}}}{R_n} \right|, \quad (6)$$

причём  $a$  выражено в неперах на километр, а  $a_n$  получается в децибелах.

3. Если  $R_n \approx |z_{\text{с}}|$ , то второе слагаемое в (6) равно нулю, и

$$a_n = 8.7 \cdot a \cdot l. \quad (6a)$$

4. При  $a \cdot l \geq 1.5 \text{ Нп}$  (13 дБ) влиянием отражённых волн пренебрегают, и затухание линии рассчитывают, как в случае согласованной нагрузки, по формуле (6a).

Общее выражение для расчёта входного сопротивления СЛ имеет вид

$$Z_{\text{вх}} = R_n \cdot \frac{ch(gl) + \frac{z_{\text{с}}}{R_n} \cdot sh(gl)}{ch(gl) + \frac{R_n}{z_{\text{с}}} \cdot sh(gl)}. \quad (7)$$

Эта формула может быть значительно упрощена для частных случаев 1, 2, 3, 4.

## 2.6. Методы корректирования АЧХ СЛ

Поскольку СЛ включают в вещательный канал в различных произвольных комбинациях, их рассматривают как самостоятельные звенья канала. Нежелательна компенсация амплитудно-частотных искажений, вносимых СЛ, в других звеньях канала - ЛУ или ПУ, так как в этом случае невозможно маневрировать усилителями и СЛ и присоединять к любому усилителю любую СЛ. Каждая СЛ должна быть скорректирована, независимо от других звеньев канала. Идентичность АЧХ скорректированных СЛ облегчает их эксплуатацию и взаимное резервирование. АЧХ скорректированной СЛ должна укладываться в пределы шаблона, изображенного на рис. 1. Численные значения положительных и отрицательных допусков на отклонение АЧХ от горизонтали в различных областях номинального диапазона частот указаны в табл. 2.

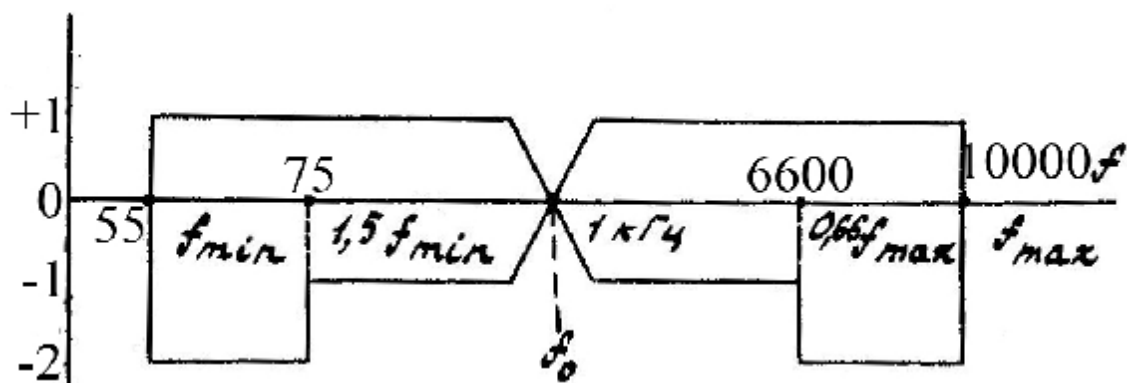


Рис. 1.

В СЛ применяют принципиально иные методы корректирования АЧХ, чем в линиях проводного вещания. Ввиду большого количества СЛ, последовательно включаемых в вещательный канал, требуется высокая точность корректирования (см. табл. 2).

Соединительные линии нагружены на активное сопротивление, величина которого соизмерима с модулем волнового сопротивления СЛ. В этих условиях затухание СЛ  $a_{\Sigma}$  монотонно возрастает с частотой (рис. 2). Физически это явление может быть объяснено с помощью эквивалентной схемы рис. 3. Она справедлива, если длина линии не превосходит

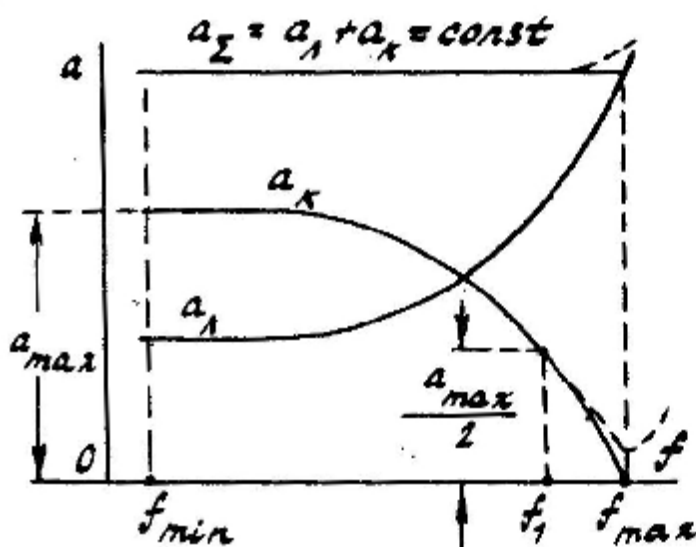


Рис. 2 – Примерная форма АЧХ СЛ и КК, отклонения от идеализированной формы изображены штриховыми линиями

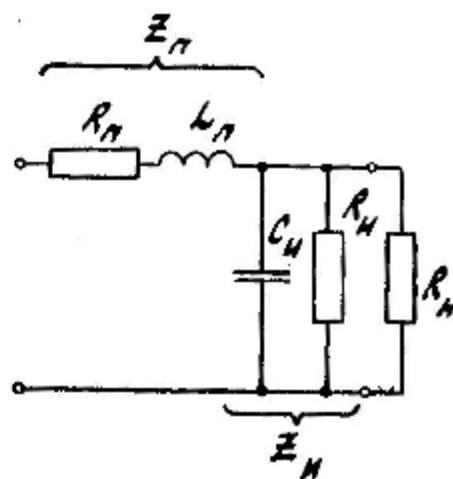


Рис. 3. – Эквивалентная схема СЛ

четверти длины волны передаваемого сигнала ( $l < \lambda/4$ ), т.е. при электрически короткой линии. Сопротивление проводов линии  $z_n = R_n + i\omega L_n$  вместе с сопротивлением  $Z_n$ , образованным сопротивлениями активных и емкостных утечек между проводами линии, и сопротивлением нагрузки  $R_n$  образуют делитель напряжения. С увеличением частоты модуль  $z_n$  увеличивается, а модуль  $Z_n$  уменьшается. Поэтому коэффициент передачи этой цепи с увеличением частоты уменьшается, а затухание растёт.

Дополнительные амплитудно-частотные искажения возникают из-за изменения входного сопротивления соединительной линии по диапазону частот. Поскольку СЛ является нагрузкой ЛУ, изменения входного сопротивления СЛ приводят к изменению падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника вещательного сигнала - ЛУ. Но при малой величине внутреннего сопротивления ЛУ эти искажения незначительны, и их не учитывают.

Для корректирования АЧХ СЛ используют особый четырехполюсник с сосредоточенными параметрами - корректирующий контур (КК). Его затухание  $a_k$  в рабочем диапазоне частот должно изменяться так, чтобы общее затухание СЛ и КК  $a_l + a_k$  не зависело от частоты (рис. 2). Предположение, что общее затухание СЛ и КК равно сумме затуханий  $a_l$  и  $a_k$  справедливо лишь в том случае, когда входное сопротивление КК постоянно в рабочем диапазоне частот и равно сопротивлению нагрузки  $R_n$ . В противном случае при подключении КК к СЛ изменится нагрузка СЛ и в соответствии с (1) изменится ее затухание.

Наибольшее затухание КК должен вносить на низшей рабочей частоте  $f_{\min}$ . До частот 500-700 Гц затухание должно оставаться примерно постоянным, а затем плавно спадать до нуля на высшей рабочей частоте  $f_{\max}$ . Физические свойства СЛ и КК различны: линия - четырехполюсник с распределенными параметрами, КК - четырехполюсник с сосредоточенными параметрами. Поэтому достичь с помощью КК полной компенсации амплитудно-частотных искажений, вносимых СЛ, невозможно.

Чем больше будет взято точек на оси частот, для которых затухание КК должно совпасть с затуханием, полученным из идеализированной кривой  $a_k$  рис. 2, тем сложнее схема КК.

Итак, КК должен иметь минимальное количество настраиваемых (подбираемых) элементов. На высшей частоте затухание КК должно приближаться к нулю. Включение КК не должно изменять частотной характеристики затухания сопряженного с ним звена, в данном случае, СЛ, иначе частотное корректирование превратится в сложный и трудоемкий процесс эмпирического подбора элементов КК. При включении КК в конце СЛ следует

применять КК с постоянным входным сопротивлением, а при включении в начале СЛ - с минимальным выходным сопротивлением. Уменьшение выходного сопротивления КК желательно и при включении КК в конце СЛ, так как при этом уменьшаются напряжения внешних помех наводимые на входную цепь усилителя, следующего после КК. Постоянство входного сопротивления полезно и в тех случаях, когда КК включен перед СЛ, так как это стабилизирует режим ЛУ.

Следовательно, КК должен иметь постоянное входное сопротивление, минимальное выходное сопротивление, минимальное затухание на высшей рабочей частоте и наименьшее количество настраиваемых элементов.

Основные схемы КК показаны на рис. 4. Простейший двухполюсник, включаемый в цепь последовательно с нагрузкой (рис.4а) или параллельно нагрузке (рис. 4б), не дает хорошего корректирования, так как входное сопротивление такого КК зависит от частоты и изменяет ход частотной характеристики СЛ. Более сложные КК (рис. 4в, г, д) обладают постоянством входного сопротивления, если их нагрузкой служит сопротивление, равное характеристическому сопротивлению КК. Полный параллельный контур (рис. 4в) обладает постоянным входным сопротивлением и большим выходным сопротивлением, изменяющимся с частотой. Полный последовательный контур (рис. 4г) имеет постоянное входное сопротивление и небольшое выходное сопротивление, также изменяющееся с частотой. По этой причине полный последовательный контур наиболее пригоден для корректирования СЛ. Т-образный мостовой контур (рис. 4д) обеспечивает постоянство входного сопротивления, но его выходное сопротивление больше, чем у полного последовательного. Поэтому он менее подходит для корректирования СЛ, хотя в типовой аппаратуре встречается довольно часто.



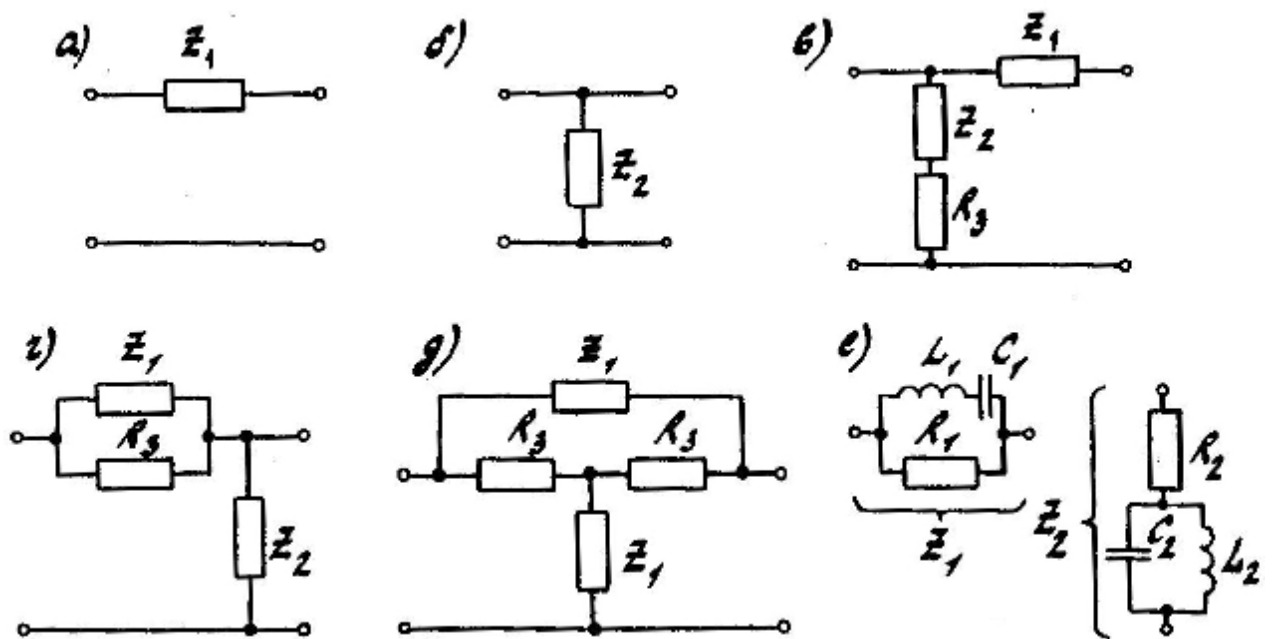


Рис. 4. Основные типы корректирующих контуров: а - контур последовательного сопротивления, б- контур параллельного сопротивления, в - полный параллельный контур, г - полный последовательный контур, д - Т-образный мостовой контур, е - схемы двухполюсников  $Z_1$  и  $Z_2$

Степень сложности двухполюсников  $Z_1$  и  $Z_2$  зависит от требуемой точности корректирования. Если двухполюсники  $Z_1$  и  $Z_2$  содержат по два элемента, причем  $Z_1$  образован параллельным соединением активного сопротивления и емкости, а  $Z_2$  - последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности, то расчетная характеристика затухания совпадет с идеализированной в двух точках - на  $f_{\min}$  (практически, в области низших частот) и на  $f_1$ . Если  $Z_1$  и  $Z_2$  - трехэлементные (рис. 4е), то совпадение получается в трех точках. При повышении требований к точности корректирования АЧХ одного КК оказывается недостаточно. Тогда используют два и более КК, причем дополнительные КК служат для корректирования неравномерности АЧХ, остающейся после введения первого КК.

Усложнение КК по экономическим причинам нежелательно. Поэтому обычно ограничиваются условием совпадения идеализированной и расчетной кривой затухания КК в трех точках, в качестве которых берут  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  и одну промежуточную. Расчетные формулы

существенно упрощаются, если в качестве промежуточной точки принять частоту  $f_1$ , на которой затухание КК равно половине максимального ( $a_{max}/2$ ).

Схемы двухполюсников  $Z_1$  и  $Z_2$  синтезируют на основе следующих соображений.

В области низших частот сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  должны быть чисто активными. На высшей расчетной частоте  $Z_1$  должно обращаться в нуль, а  $Z_2$  приближаться к бесконечности. Этого можно достичь, выполнив  $Z_1$  в виде последовательного, а  $Z_2$  в виде параллельного колебательного контура. Резонансные частоты контуров должны быть равны и совпадать с высшей частотой рабочего диапазона  $f_{max}$ . Затухание КК в области низших частот определяется соотношением  $R_1$  и  $R_2$ :

$$a_{max} = 20 \cdot \lg \left| 1 + \frac{R_1}{R_2} \right|. \quad (8)$$

Крутизна частотной характеристики затухания КК растет с увеличением отношения  $L_1/L_2$ , соответственно при этом увеличивается частота половинного затухания  $f_1$ . Потери в колебательных контурах уменьшают точность корректирования на высших частотах. Поэтому катушки индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  должны иметь возможно меньшее активное сопротивление. Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  должны иметь малые диэлектрические потери.

## 2.7. Расчет элементов корректирующего контура

Для расчета элементов КК нужно получить идеализированную характеристику затухания КК, при которой амплитудно-частотные искажения были бы полностью скомпенсированы. Для этого строят частотную характеристику затухания СЛ и проводят горизонтальную прямую, изображающую суммарную характеристику затухания СЛ и КК и лежащую примерно на 1 дБ выше максимального значения затухания СЛ. Эту прибавку затухания делают потому, что из-за потерь нельзя реализовать КК с затуханием на высшей частоте, равным нулю. Вычитая из ординаты горизонтальной прямой значения затухания СЛ на разных частотах, строят идеализированную кривую затухания КК.

Как уже отмечалось, рассматриваемый метод построения АЧХ КК основан на предположении, что расчетная кривая затухания СЛ не изменится после подключения КК и

$$a_{\Sigma} = a_{\text{л}} + a_{\text{к}} \quad (9)$$

При включении КК в конце СЛ (рис. 5а) это справедливо в том случае, когда  $Z_{\text{вхКК}} = R_n$ .

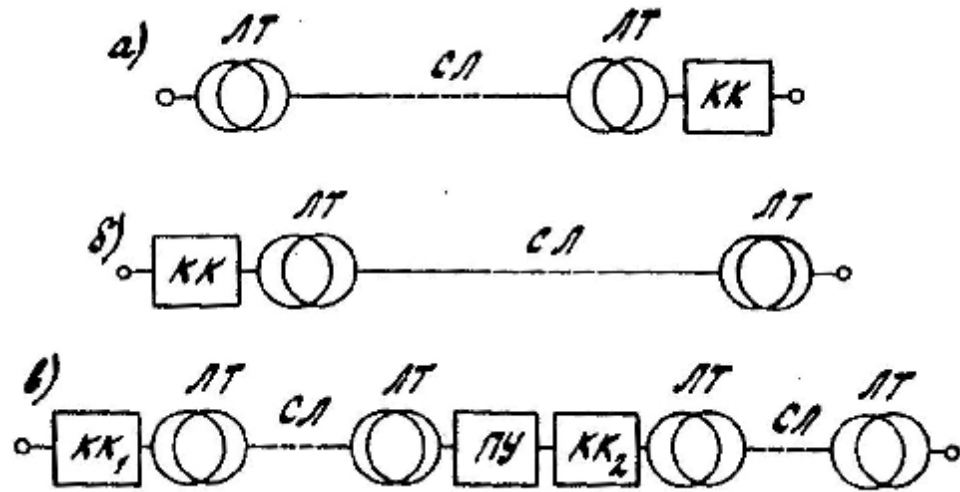


Рис. 5 – Включение корректирующего контура: а – в конце СЛ, б – в начале СЛ, в – в начале СЛ и после промежуточного усилителя

В противном случае при включении вместо  $R_n$  КК затухание СЛ изменится и тогда  $a_{\Sigma} \neq a_d + a_k$ . По этой же причине для корректирования СЛ годны лишь те КК, у которых  $Z_{\text{вх}} = R_n$  во всей рабочей полосе частот. Этому условию удовлетворяют КК, построенные по схемам рис. 4в,г,д, причем  $Z_{\text{сКК}} = R_0$ .

При включении КК в начале СЛ (рис. 5б) желательно, чтобы выходное сопротивление КК равнялось внутреннему сопротивлению эквивалентного генератора (в нашем случае, выходному сопротивлению ЛУ). Поскольку по нормам выходное сопротивление ЛУ не должно превышать 20 Ом, реализовать КК со столь малым выходным сопротивлением очень трудно. Поэтому довольствуются тем, чтобы  $Z_{\text{выхКК}}$  было бы возможно меньше. В наибольшей степени этому условию удовлетворяет контур, изображенный на рис. 4г.

Величины элементов, входящих в КК, удовлетворяют условиям

$$L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2 = \frac{1}{w_{\text{max}}^2}, \quad (10)$$

$$R_1 \cdot R_2 = \frac{L_1}{C_2} = \frac{L_2}{C_1} = \text{const} = R_0^2. \quad (11)$$

Постоянная величина должна иметь размерность квадрата сопротивления и поэтому обозначается как  $R_0^2$ . Для КК, построенных по схемам 4в,г,д,  $R_0 = Z_c$ . Величины элементов КК рассчитываются по формулам:

$$R_1 = (k - 1) \cdot R_0, \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{R_0}{(k - 1)}, \quad (13)$$

$$L_1 = \frac{R_0 \cdot B}{w_{max}}, \quad (14)$$

$$L_2 = \frac{R_0}{w_{max} \cdot B}, \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{1}{w_{max} \cdot B \cdot R_0}, \quad (16)$$

$$C_2 = \frac{B}{w_{max} \cdot R_0}. \quad (17)$$

Сопротивление  $R_3 = Z_c = R_0$ .

В схеме рис. 4г сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  объединяют в одно -  $R_1'$ . Его величину рассчитывают по формуле (18), вытекающей из (12):

$$R_1' = \frac{(k - 1)}{k} \cdot R_0. \quad (18)$$

Параметр  $k$  является величиной, обратной минимальному коэффициенту передачи КК, которым КК обладает на постоянном токе и на низших частотах рабочего диапазона:  $k = I/K_{min}$ . Он связан с максимальным вносимым затуханием КК соотношением:

$$a_{max} = 20 \cdot \lg \frac{1}{K_{min}} = 20 \cdot \lg k. \quad (19)$$

Параметр  $k$  определяют, потенцируя (19).

Параметр  $w_1$  - частота, на которой затухание КК равно половине максимального.

Параметры  $B$  и  $d$  определяют по формулам (20) и (21)

$$B = \frac{k-1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{d^2-1}, \quad (20)$$

$$d = \frac{w_{max}}{w_1}, \quad (21)$$

причём  $w_{max} = \frac{1}{2p \cdot f_{max}}.$

Частотную характеристику КК с двухполюсниками, содержащими по три элемента, строят, пользуясь формулой

$$a_{\kappa} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k \cdot \left( \frac{d - \frac{1}{d}}{\frac{w}{w_{max}} - \frac{w_{max}}{w}} \right)^2} \right] \quad (22)$$

Если двухполюсники  $Z_1$  и  $Z_2$  содержат по два элемента, то  $R_1$  и  $R_2$  определяют соответственно по (12) и (13):

$$C_1 = \frac{1}{w_1 R_0} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k-1}, \quad (23)$$

$$L_2 = \frac{R_0}{w_1} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k-1}, \quad (24)$$

а частотную характеристику строят, пользуясь формулой

$$a_{\kappa} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k \left( \frac{w}{w_1} \right)^2} \right]. \quad (25)$$

## 2.8. Выбор места включения корректирующего контура

Для корректирования АЧХ безразлично, включен ли КК в конце или в начале СЛ (рис. 5а, б). Но принятое нормирование номинальных уровней и наличие в СЛ помех заставляют пересмотреть это утверждение.

При включении КК в конце СЛ номинальный уровень в начале СЛ ограничен величиной +17 дБ, а в конце СЛ 0 дБ (рис. 6а). Поэтому длина СЛ ограничена максимальным затуханием 17 дБ.

При включении КК в начале СЛ номинальный входной уровень по действующим нормам не должен превышать +17 дБ на частоте 1 кГц, +23 дБ на частоте 3 кГц, а дальше может плавно увеличиваться с ростом частоты (рис. 6б).

Из сравнения двух способов корректирования СЛ видно, что включение КК в начале СЛ позволяет увеличить максимальное затухание СЛ до 30 дБ, т.е. вдвое увеличить длину СЛ. Разумеется, включение КК в начале СЛ заставляет во много раз увеличить мощность, отбираемую от ЛУ. Мощность, отбираемая от ЛУ при включении КК в конце СЛ равна

$$P = \frac{U^2}{|z_{ex}|}. \quad (26)$$

Из рис. 7 видно, что на частотах более 1 кГц входное сопротивление СЛ примерно равно волновому:  $|z_{ex}| \approx |z_e|$ . Поэтому для упрощения расчетов можно положить, что

$$P \approx \frac{U^2}{|z_e|}. \quad (27)$$

Мощность, отбираемая от ЛУ при включении КК в начале СЛ, равна

$$P = \frac{U^2}{|z_{exKK}|}. \quad (28)$$

Включение КК на входе СЛ заставляет прибегать к некоторым усложнениям.

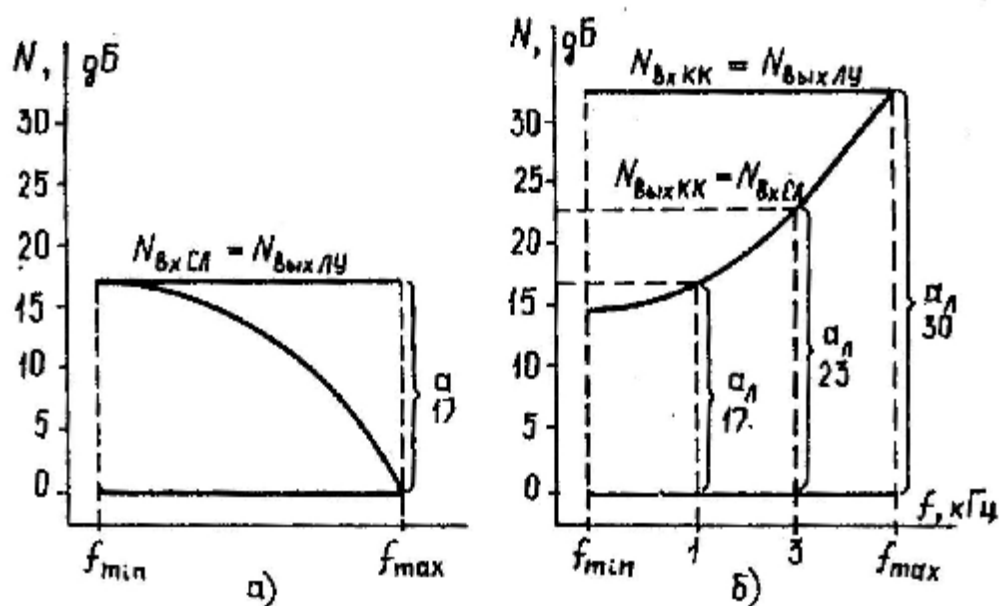


Рис. 6 – Изменение номинальных уровней в зависимости от частоты:

а – при включении КК в конце СЛ, б – при включении КК в начале СЛ

КК, включенный на выходе СЛ, нагружен на активное сопротивление  $R_n$ , причем характеристическое сопротивление КК равно  $R_n$ . КК, включенный на входе СЛ, нагружен на входное сопротивление СЛ, являющееся комплексной величиной, модуль которой уменьшается примерно в 10 раз при увеличении частоты в пределах рабочей полосы, как это видно из рис. 7. По этой причине изменение затухания КК по диапазону частот сильно отличается от расчетного. Особенно большое расхождение получается в области высших звуковых частот. Погрешность корректирования получается чрезмерной (более 3 дБ). Поэтому при включении КК перед СЛ прибегают к стабилизации нагрузки КК.

Чаще всего шунтируют выход КК активным сопротивлением, примерно равным модулю входного сопротивления линии на высшей частоте рабочей полосы. Например, на ЦС МГРС применяют активные шунты 290 Ом при корректировании в диапазоне частот от 10 кГц и 390 Ом при корректировании в диапазоне частот до 6 кГц (рис. 8). При этом погрешность корректирования не превышает 1-1,5 дБ. Переменные конденсаторы в схеме рис. 8 служат для более точной подстройки АЧХ. Сопротивление нагрузки КК менее зависит от частоты, если выход КК шунтировать цепью, состоящей из последовательно включённых активного сопротивления  $R_{ш}$  и индуктивности  $L_{ш}$ . Входное сопротивление СЛ имеет

емкостной характер. На выбранной частоте определяют модуль и фазовый угол входного сопротивления СЛ  $z_{ex}$  и вычисляют эквивалентные ёмкость и активное сопротивление

$$C_э = \frac{1}{w' |z_{ex}| \sin j}, \quad (29)$$

$$R_э = |z_{ex}| \cos j. \quad (30)$$

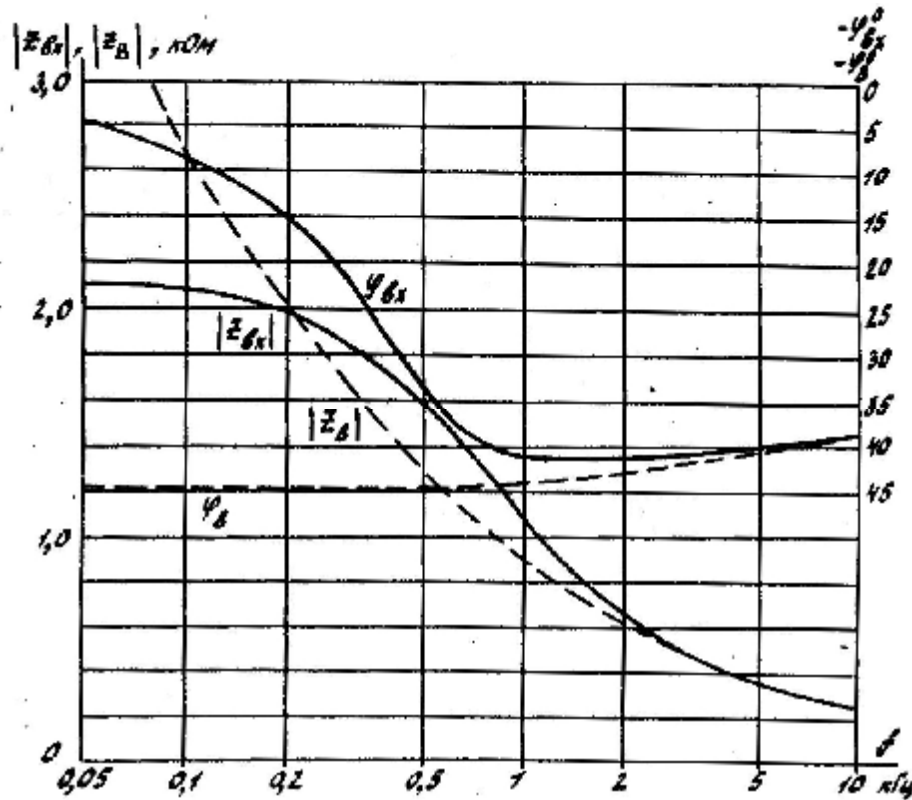


Рис. 7. – Частотные характеристики модуля и угла входного сопротивления (сплошные кривые) и волнового сопротивления (штриховые кривые) СЛ с параметрами:

длина 8 км, диаметр жил 0.5 мм, сопротивление нагрузки 600 Ом

Если параллельно выходу КК включить последовательно соединение  $L_{ш}$  и  $R_{ш}$

$$R_{ш} = R_э, \quad (31)$$

$$L_{ш} = \frac{|z_{ex}| \sin j}{w'}, \quad (32)$$

то в результате резонанса токов реактивное сопротивление обратится в нуль и общее сопротивление останется равным  $R_{ш}$ .



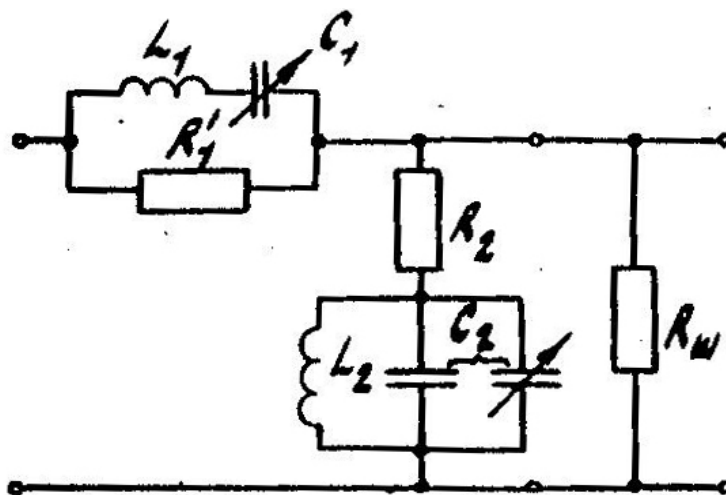


Рис. 8. – Схема корректирующего контура и шунта, используемого в СЛ городской радиотрансляционной сети

Так как эквивалентные параметры зависят от частоты, то полной стабилизации нагрузки КК достичь нельзя. Но изменение модуля общего сопротивления нагрузки КК в этом случае не превышает 20%, а изменение фазового угла общего сопротивления нагрузки КК - 5-7°.

Чтобы величина сопротивления нагрузки КК изменялась по рабочему диапазону возможно меньше, частоту  $f'$ , на которой производится компенсация реактивной составляющей входного сопротивления СЛ, берут несколько ниже максимальной рабочей частоты, например, при  $f_{max} = 10$  кГц,  $f' = 8$  кГц. Сопротивление нагрузки КК при этом практически постоянно и близко к активному (фазовый угол менее 2,5°).

Рассмотренный двухэлементный шунт позволяет увеличить расчетное сопротивление нагрузки КК примерно на 25%, уменьшить тем самым потребление мощности от ЛУ на 30-40% и одновременно увеличить точность частотного корректирования [12].

Возможны случаи, когда из-за большой протяженности СЛ ее затухание настолько велико, что оно не может быть скомпенсировано даже при включении КК в начале СЛ. Тогда СЛ разделяют на участки. Перед вторым участком включают промежуточный усилитель ПУ и второй корректирующий контур КК<sub>2</sub> (рис. 5в). При применении ПУ помехи обоих участков суммируются. Для получения допустимого уровня помех нужно в каждом участке обеспечить уровень помех на 3 дБ ниже нормы. Для уменьшения номинальной мощности ПУ рекомендуют КК<sub>2</sub> включить не после ЛУ, а до него.

## 2.9. Указания по выбору других элементов СЛ

Параметры СЛ приведены в справочниках по линиям связи, а также в п.1.7 задания.

Схема СЛ может быть изображена как в однопроводной, так и в двухпроводной форме.

Схема КК в зависимости от требуемой точности корректирования может быть выбрана как с двухэлементными, так и с трехэлементными ветвями  $Z_1$ , и  $Z_2$ . Следует лишь обосновать выбор схемы КК.

В последние годы все чаще применяют ЛУ с симметричным (двухтактным) выходом; вход усилителей, включаемых после СЛ, также делают симметричным, и надобность в симметрирующих ЛТ на входе и выходе СЛ отпадает. Симметрирующие ЛТ сохраняются, главным образом, на СЛ узлов проводного вещания, поскольку ЛТ необходимы для образования искусственной (фантомной) цепи, по которой передаются сигналы дистанционного управления или контроля (рис. 9).

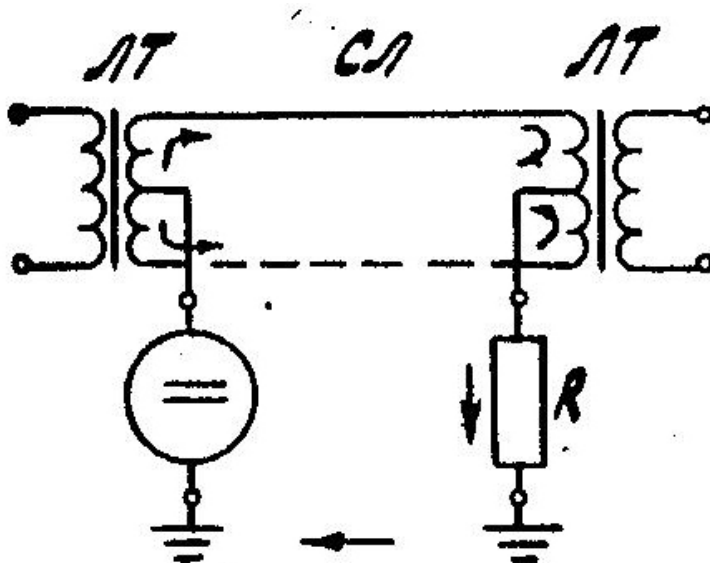


Рис. 9. – Схема образования искусственной цепи

Пример построения схемы СЛ, входящей в систему проводного вещания большого города, показан на рис.10. Здесь: ЛУ - линейный усилитель (выходная мощность - несколько сот ватт, номинальное выходное напряжение 60 В), Тр - трансформатор с секционированной вторичной обмоткой, рассчитанной на номинальные напряжения 6, 9, 14, 21, 26, 32 В, КК – корректирующие контуры, ЛТ - линейные трансформаторы, РГ - разрывное гнездо, КГ - контрольное гнездо, ПУ - промежуточный усилитель с симметричным выходом, УР -

установочный регулятор. В отдельных случаях включается третья ступень коррекции - УКЛ - усилитель конца линии с симметрирующим входным трансформатором и встроенным корректирующим контуром на входе. Сопротивлением нагрузки служит входное сопротивление аппаратуры, установленной на оконечной усилительной станции ОУС или блок подстанции БПС. В зависимости от протяженности СЛ включают ПУ и КК<sub>2</sub> или УКЛ, в отдельных случаях - оба устройства одновременно.

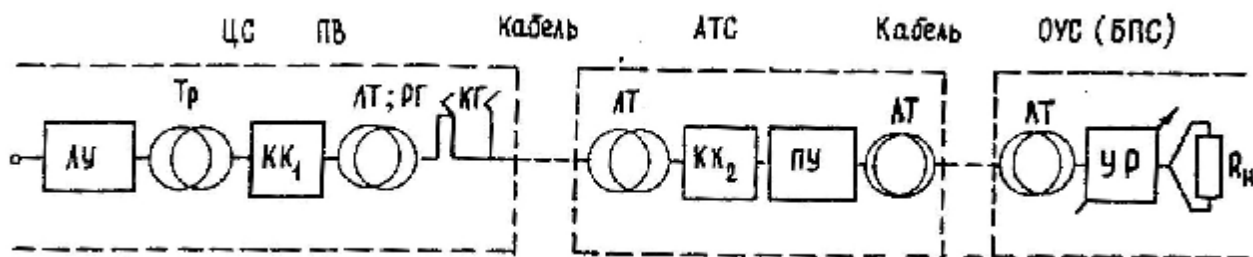


Рис.10. – Схема СЛ с промежуточным усилителем

## 2.10. Порядок расчета

Последовательность расчетов вытекает из изложенной методики. Вначале по таблицам или расчетом находят вторичные параметры пары кабеля, рассчитывают  $a_l$  и  $z_{ex}$  и вычерчивают частотную характеристику затухания СЛ. Затем строят идеализированную частотную характеристику затухания КК, находят из нее величины  $a_{max}$  и  $f_l$  и по ним параметры  $B$  и  $d$ . Далее рассчитывают и строят частотную характеристику затухания КК, находят общую (суммарную) характеристику затухания СЛ и КК и определяют, входит ли она в поле допусков табл. 1. Если это условие нарушается, подбирают иную величину  $f_l$  до получения заданной неравномерности АЧХ. После этого рассчитывают величины элементов КК.

Если общее затухание СЛ и КК превышает норму 17 дБ, переносят КК в начало СЛ, при необходимости вводят в схему и рассчитывают шунт на выходе КК. Если общее затухание СЛ на частоте 3 кГц превышает 23 дБ, в схему СЛ вводят ПУ. Нового расчета затухания СЛ и КК при этом можно не проводить во избежание чрезмерного увеличения объема работы.

Если студент лишен возможности взять вторичные параметры заданной кабельной пары из справочника, он может рассчитать их по формулам (2) и (3), где  $z = R + i\omega l$  и  $Y = G + i\omega C$  - первичные параметры.

В тексте работы достаточно привести подробный расчет затухания только для одной частоты. Промежуточные и окончательные результаты расчета затухания сводят в таблицу, составленную, например, по такой форме: по горизонтали указывают величины частот; по вертикали располагают графы: частота  $f$ , круговая частота  $w$ ,  $wL$ ,  $wC$ ,  $z$ ,  $Y$ ,  $z_g$ ,  $g$ ,  $gl$ ,  $chgl$ ,  $shgl$ ,  $\frac{z_g}{R_n} shgl$ ,  $A = chgl + \frac{z_g}{R_n} shgl$ ,  $|A|$ ,  $lg A$ ,  $a_n$ . При использовании табличных величин  $z_g$  и  $Y$  графы, предназначенные для результатов расчета  $w$ ,  $wL$ ,  $wC$ ,  $z$  и  $Y$ , исключают. Единицы измерения или размерности приводимых в таблице величин отделяют от них запятой.

Аналогично подробный расчет затухания КК приводят только для одной частоты. Промежуточные и конечные результаты расчета затухания КК сводят в таблицу, например, следующего вида: по горизонтали - величины частоты, по вертикали - частота, значения затухания в соответствии с идеализированной частотной характеристикой затухания КК

$$a_{к.ид}, \frac{f}{f_1}, k\left(\frac{f}{f_1}\right)^2, 1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k\left(\frac{f}{f_1}\right)^2}, lg\left[1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k\left(\frac{f}{f_1}\right)^2}\right], \text{ расчётные величины затухания } a_{кр},$$

общее затухание  $a_{\Sigma} = a_n + a_{кр}$ .

Далее определяют величины элементов КК. Для самоконтроля правильности расчета элементов КК можно указать, что индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  составляют десятки миллигенри, а емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  имеют величину порядка 0,1 мкФ.

Количество и значения частот, на которых производится расчет выбираются студентом. Количество частот должно быть не менее пяти.

## 2.11. Пример расчета

Рассчитаем в виде примера затухание СЛ длиной 28 км, для которой используем кабель с диаметром жил 1,4 мм. Первичные параметры кабеля:  $R = 32$  Ом/км,  $L = 0,7$  мГн/км,  $C = 0,036$  мкФ/км,  $G = 12$  мкСм/км. Примем сопротивление нагрузки равным 600 Ом, допустимую величину неравномерности частотной характеристики затухания 1 дБ. Положим, что выходное сопротивление ЛУ не превышает 20 Ом. По рассчитанной и построенной частотной характеристике затухания определим параметры КК. Расчеты проведем на частотах 50, 200, 800, 3200 к 10000 Гц.

На частоте 50 Гц:

$$wL = 6.28 \cdot 50 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} = 0.22 \text{ Ом/км}$$

$$wC = 6.28 \cdot 50 \cdot 0.036 \cdot 10^{-6} = 11.3 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$$

$$z = 23 + i0.22 \approx 23 \text{ Ом/км}$$

$$Y = 12 \cdot 10^{-6} + i11.3 \cdot 10^{-6} = 16.5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{i43^\circ} \text{ См/км.}$$

В дальнейшем будем использовать более простую форму записи комплексных чисел:  
 $A = |A|e^{ij} = |A|\angle j$ .

Вторичные параметры СЛ рассчитываем по (2) и (3).

$$Z_g = \sqrt{\frac{23\angle 0^\circ}{16.5 \cdot 10^{-6} \angle 43^\circ}} = 1180 \angle -21.5^\circ \text{ Ом}$$

$$g = \sqrt{23\angle 0^\circ \cdot 16.5 \cdot 10^{-6} \angle 43^\circ} = 0.02 \angle 21.5^\circ \text{ 1/км,}$$

$$gl = 0.02 \angle 21.5^\circ \cdot 28 = 0.56 \angle 21.5^\circ.$$

При отсутствии специальных таблиц гиперболических функций комплексного переменного гиперболические косинусы и синусы можно вычислять по формулам разложения или с использованием калькулятора..

Для уменьшения затрат времени на расчеты пользуйтесь во всех случаях, когда это возможно, упрощенными формулами (4), (5) и (6).

$$\text{Итак, для частоты 50 Гц } chgl = 1.11 + i0.11; shgl = 0.57 \angle 24^\circ$$

$$\text{Далее, } \frac{Z_g}{R_n} shgl = \frac{1180 \angle -21.5^\circ}{600} \cdot 0.57 \angle 24^\circ = 1.11 \angle 2.5^\circ = 1.11 + i0.05.$$

Затухание СЛ

$$\alpha_n = 20 \lg |1.11 + i0.11 + 1.11 + i0.05| = 20 \lg |2.22 + i0.16| = 20 \lg 2.22 = 6.9 \text{ дБ.}$$

Аналогично определяем затухание СЛ для других частот, указанных выше. Полученные данные сводим в табл. 3. По этим данным строим частотную характеристику затухания СЛ (рис. 11).

Таблица 3

$f$ , Гц	50	200	800	3200	10000
$wL$ , Ом	0.22	0.88	3.52	14.1	44
$wC \cdot 10^{-6}$ , См	11.3	45.3	181	724	2260
$z$ , Ом/км	$23 \angle 0^\circ$	$23 \angle 2^\circ$	$23.3 \angle 8^\circ$	$27 \angle 31.5^\circ$	$49 \angle 62^\circ$

$Y, \text{ Ом/км}$	$16.5 \angle 43^\circ$	$46.7 \angle 75^\circ$	$181 \angle 86^\circ$	$724 \angle 89^\circ$	$2260 \angle 90^\circ$
$z_e, \text{ Ом}$	$1180 \angle -21.5^\circ$	$702 \angle -36.5^\circ$	$357 \angle -39^\circ$	$193 \angle -29^\circ$	$148 \angle -13.5^\circ$
$g, 1/\text{км}$	$0.02 \angle 21.5^\circ$	$0.033 \angle 39^\circ$	$0.065 \angle 47^\circ$	$0.14 \angle 60^\circ$	$0.34 \angle 76^\circ$
$gl$	$0.56 \angle 21.5^\circ$	$0.92 \angle 39^\circ$	$1.82 \angle 47^\circ$	$3.92 \angle 60^\circ$	$9.5 \angle 76^\circ$
$chgl$	$1.11 + i0.11$	$1.06 + i0.42$	$0.43 + i1.5$	$-3.22 + i0.74$	$-4.54 + i1.08$
$shgl$	$0.57 \angle 24^\circ$	$0.95 \angle 46^\circ$	$1.84 \angle 79^\circ$	$3.38 \angle 14^\circ$	$4.74 \angle 20^\circ$
$\frac{z_e}{R_n} shgl$	$1.11 + i0.05$	$1.09 + i0.19$	$0.87 + i0.71$	$-1.06 + i0.28$	$-0.98 + i0.65$
$A = chgl + \frac{z_e}{R_n} shgl$	$2.22 + i0.16$	$2.15 + i0.61$	$1.30 + i2.21$	$-4.28 + i1.02$	$-5.52 + i1.73$
$ A $	2.22	2.23	2.56	4.45	5.79
$ lg A $	0.345	0.35	0.41	0.65	0.76
$a_n, \text{ дБ}$	6.9	7.0	8.2	13.0	15.2

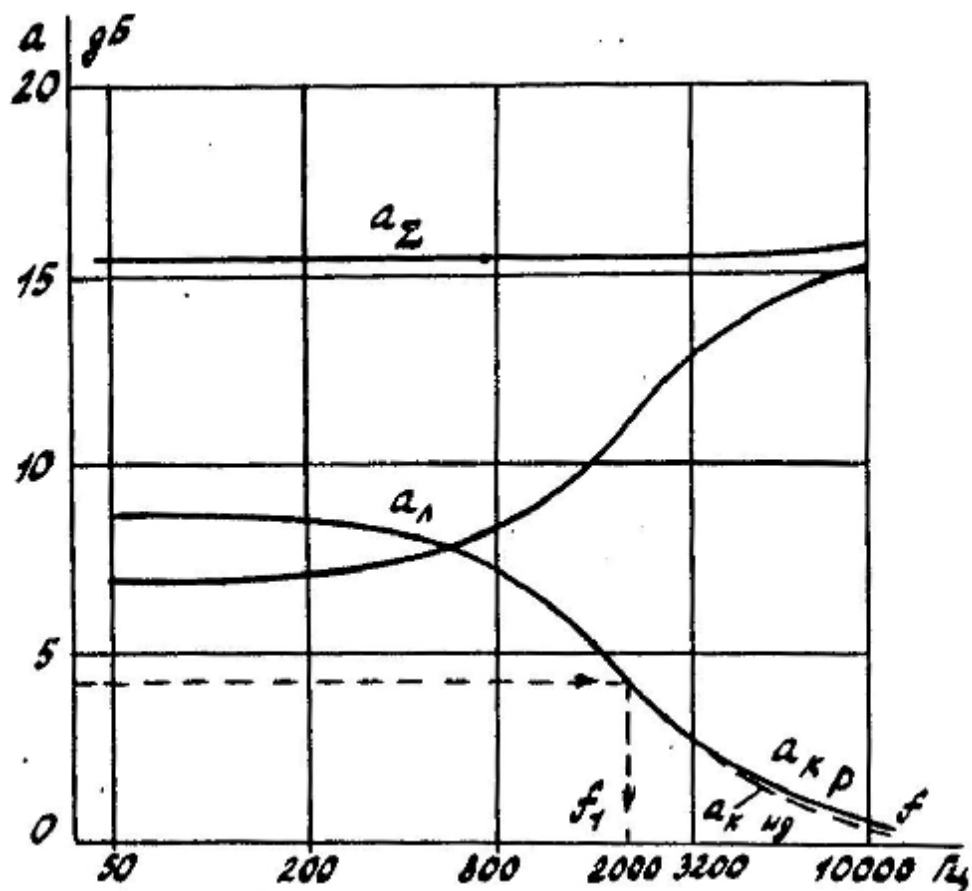


Рис. 11. – Частотные характеристики затухания СЛ и КК

Далее графически определяем ординаты идеализированной частотной характеристики затухания КК. Принимаем  $a_{\Sigma}$ , равным 15.5 дБ. Тогда величины затухания КК определяются как разность между этой величиной и соответствующими величинами затухания СЛ. В частности, максимальное затухание корректирующего контура  $a_{max} = 15.5 - a_{min} = 15.5 - 6.9 = 8.6$  дБ. По максимальной величине затухания контура находим параметр  $k$ :

$$a_{max} = 20 \lg k, \lg k = \frac{a_{max}}{20} = \frac{8.6}{20} = 0.43, k = 2.7, \text{ а из графика } a_{к.уд} - \text{ параметр } f_1. \text{ Он равен}$$

2000 Гц.

Затухание КК определяем по формуле (25). Промежуточные и конечные результаты расчёта КК сводим в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчёт затухания КК

$f, \text{ Гц}$	50	200	800	3200	10000
$a_{к.уд}, \text{ дБ}$	8.6	8.5	7.3	2.5	0.3
$\frac{f}{f_1}$	0.025	0.1	0.4	1.6	5.0
$k \cdot \left(\frac{f}{f_1}\right)^2$	0.017	0.027	0.43	27.4	67.0
$1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k \cdot \left(\frac{f}{f_1}\right)^2}$	7.2	7.0	5.3	1.8	1.1
$\lg \left[ 1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k \cdot \left(\frac{f}{f_1}\right)^2} \right]$	0.86	0.85	0.73	0.25	0.037
$a_{кр}, \text{ дБ}$	8.6	8.5	7.3	2.5	0.37
$a_{\Sigma}, \text{ дБ}$	15.5	15.5	15.5	15.5	15.6

В качестве КК используем мостовой Т-образный контур. Примем, что его характеристическое сопротивление равно сопротивлению нагрузки СЛ. По величинам  $z_c = R_0, f_1$  и  $k$  определим параметры контура.

$$R_1 = R_0(k - 1) = 600(2.7 - 1) = 1 \text{ кОм},$$

$$R_2 = R_0 / (k - 1) = 600 / (2.7 - 1) = 350 \text{ Ом},$$

$$C_1 = \frac{1}{w_1 R_0} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k - 1} = \frac{1}{6.28 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 600} \cdot \frac{\sqrt{2.7}}{2.7 - 1} = 0.13 \text{ мкФ},$$

$$L_2 = \frac{R_0}{w_1} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k - 1} = \frac{600}{6.28 \cdot 2 \cdot 10^3} \cdot \frac{\sqrt{2.7}}{2.7 - 1} = 46.6 \text{ мГн}.$$

Неравномерность суммарной частотной характеристики затухания получилась равной 0.1 дБ, что существенно меньше допустимой. Поэтому результат расчета следует признать удовлетворительным.

Мощность, потребляемая СЛ от ЛУ, равна

$$P \approx \frac{U^2}{|z_{\text{с}}|} = \frac{5.5^2}{357} \approx 0.1 \text{ Вт}$$

Диаграммы уровней для частот 50, 800 и 10000 Гц изображены на рис. 12. Уровень в конце СЛ доводится до номинального уровня 0 дБ установочным регулятором УР, имеющимся на входе аппаратуры.

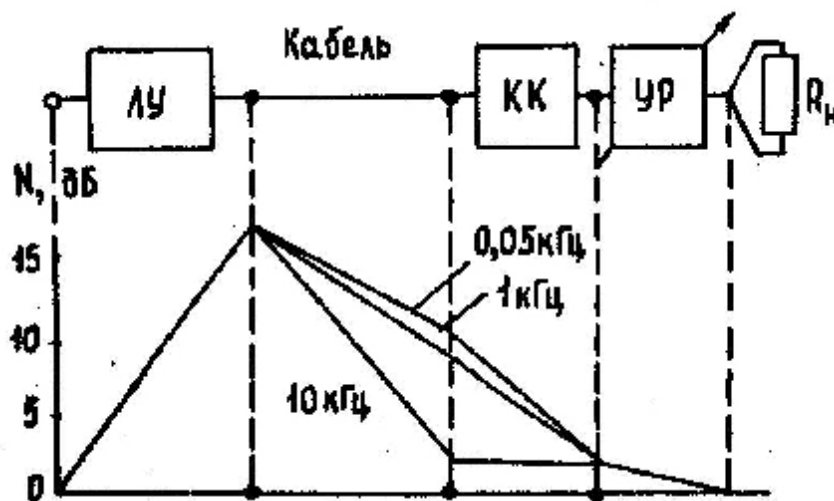


Рис. 12. – Диаграмма уровней СЛ