

## ЗАТУХАНИЕ ОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ И АМПЛИТУДНЫХ ВЫРАВНИВАТЕЛЕЙ

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучить частотную зависимость волнового затухания однородной линии, ее влияние на передачу сигналов, а также способы и устройства коррекции амплитудных искажений.

### 7.1. Краткие сведения из теории

При передаче разговора, музыки и различной информации по электрическим цепям распространяются несинусоидальные токи, являющиеся сложными функциями времени. Периодические напряжение и ток удобно представлять рядами Фурье в виде суммы гармонических составляющих. Совокупность комплексных амплитуд гармонических колебаний кратных частот, воспроизводящих исходное напряжение (ток), образует его дискретный спектр.

Непериодические (конечные во времени) напряжение и ток представляются в виде суммы бесконечно большого числа бесконечно малых слагаемых интегралом Фурье. Спектр непериодического сигнала (напряжения или тока) является непрерывным и полностью определяется его временной зависимостью:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (7.1)$$

Таким образом, при передаче электрических сигналов по цепи связи распространяется большое количество гармонических составляющих с разными частотами, амплитудами и начальными фазами. Составляющие сигнала имеют разные частоты, претерпевают при передаче по линии различные изменения амплитуд и фазовые сдвиги, а в случае несогласованной нагрузки – отражения. Вследствие этого соотношения между амплитудами и фазами составляющих сигнала в конце цепи не такие, как в ее начале, поэтому при суммировании составляющих в конце цепи сигнал (напряжение или ток) отличается по форме от исходного.

Отличие формы временной зависимости сигнала на выходе цепи от формы временной зависимости на ее входе есть искажения сигнала при передаче. В однородных линиях возникают искажения отражения (от попутного потока), амплитудно-частотные (амплитудные) и фазочастотные (фазовые).

Амплитудно-частотные искажения возникают вследствие неодинакового изменения токов различных частот: более высокие частоты передаются по линиям с большим ослаблением, т. е. амплитуды колебаний более высоких частот уменьшаются в большее число раз, чем амплитуды колебаний более низких частот. В результате этого соотношение амплитуд колебаний в конце цепи может существенно отличаться от соотношения амплитуд в начале цепи, что приводит к изменению формы сигнала (рис. 7.1).

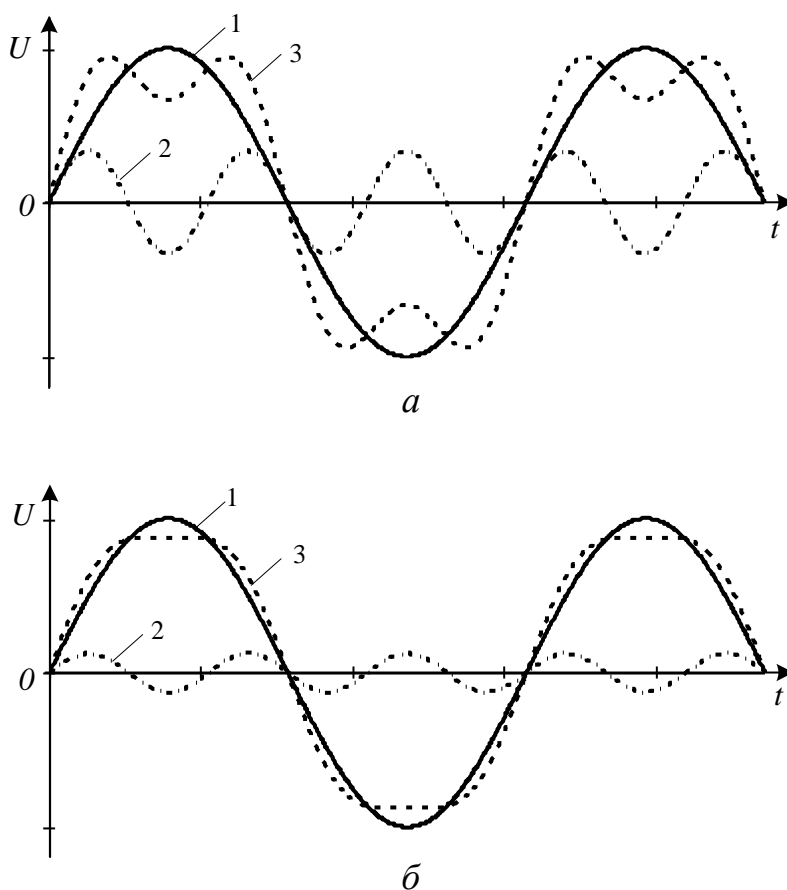


Рис. 7.1. Амплитудно-частотные искажения:  
 $a$  – неискаженный сигнал на входе;  $b$  – искаженный сигнал на выходе цепи;  
 1 – основная гармоника; 2 – третья гармоника; 3 – сигнал

Степень амплитудно-частотных искажений оценивается разностью волновых затуханий цепи при двух частотах, и чем больше эта разность, тем больше амплитудные искажения. На тональных частотах амплитудные искажения

меньше на воздушных цепях из цветных металлов и больше на стальных цепях и в симметричных кабелях.

Частотную зависимость волнового затухания однородной линии можно рассчитать теоретически, если известны ее конструктивные параметры: материал и диаметр проводов, расстояние между ними, тип изоляции и т. д., однако при теоретическом расчете осложняется учет влияния соседних цепей, состояния погоды, изоляции и других факторов на величину  $a_v$ . Наиболее достоверные данные для конкретной реально существующей цепи получают экспериментальным путем.

Для измерения волнового затухания целесообразно использовать метод моста переменного тока или метод уровней.

Первый метод обеспечивает высокую точность лишь при  $\alpha l < 5$  дБ и требует значительных затрат времени как на проведение измерений, так и на их обработку. Метод уровней менее трудоемок, но при его использовании необходимо обеспечить согласование нагрузки с волновым сопротивлением линии на всех измеряемых частотах, для чего нужно знать зависимость  $Z_v(\omega)$  в исследуемом диапазоне.

Для устранения амплитудно-частотных искажений сигналов или уменьшения их до допустимого значения в тракт передачи цепочечно включаются специальные четырехполюсники – амплитудные выравниватели (корректоры), которые должны выравнивать ослабление линии в полосе передаваемых частот таким образом, чтобы общее ослабление цепи и контура было постоянным и не зависящим от частоты, т. е.

$$a_{ц.к} = a_{ц} + a_{к} = \text{const}, \quad (7.2)$$

где  $a_{ц}$ ,  $a_{к}$  – ослабление цепи и корректирующего контура соответственно;

$a_{ц.к}$  – общее ослабление цепи и контура.

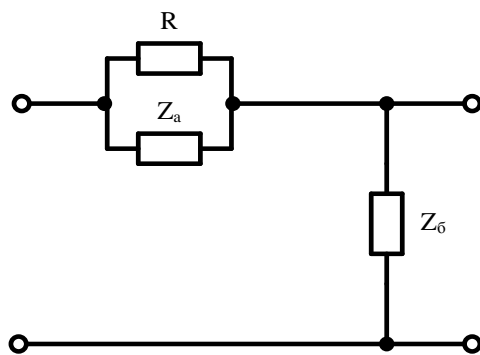
Имеется несколько типов четырехполюсников, которые чаще всего используются в качестве амплитудных выравнивателей. Выбор типа звена определяется в первую очередь требованиями к входному сопротивлению и точностью воспроизведения заданной частотной характеристики.

Так как входные сопротивления различных элементов (фильтры, однородные линии, трансформаторы) в полосе передаваемых частот часто близки к чисто активным сопротивлениям, то входное сопротивление амплитудного выравнивателя также должно быть постоянным, не зависящим от частоты. Этим

свойством обладают некоторые схемы симметричных и несимметричных четырехполюсников (мостовые, Т-образные мостовые, Г-образные), в последовательные и параллельные плечи которых включены обратные двухполюсники, причем наименьшее число элементов содержит схема Г-образного четырехполюсника.

Схема простейшего Г-образного четырехполюсника содержит по два элемента в последовательном и параллельном плечах (рис. 7.2). Соединение такого корректора с другими элементами тракта передачи осуществляется на принципе повторности.

Матрица параметров четырехполюсника, изображенного на рис. 7.2, записывается следующим образом:



$$(A) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{RZ_a}{Z_6(R + Z_a)} & \frac{RZ_a}{R + Z_a} \\ \frac{1}{Z_6} & 1 \end{pmatrix}. \quad (7.3)$$

Рис. 7.2. Схема простейшего Г-образного четырехполюсника

Так как двухполюсники  $Z_a$  и  $Z_6$  являются обратными в соотношении  $R^2$ , то коэффициент

$$A_{11} = 1 + \frac{Z_a}{R + Z_6}. \quad (7.4)$$

Значение повторного сопротивления при прямом направлении передачи с учетом соотношений (7.2), (7.3) вычисляем по формуле:

$$Z_{н1} = \frac{A_{11} - A_{22} + \sqrt{(A_{11}^2 - A_{22}^2)^2 - 4}}{2A_{12}} = \frac{R^2}{2(R + Z_6)} + \frac{Z_6(Z_a + R)}{2(R + Z_6)} = R. \quad (7.5)$$

Повторное ослабление

$$a_n = \ln \left| \frac{A_{11} + A_{22}}{2} + \sqrt{\left( \frac{A_{11} + A_{22}}{2} \right)^2 - 1} \right| = \ln \left| 1 + \frac{Z_a}{R} \right|. \quad (7.6)$$

Анализируя соотношения (7.5) и (7.6), сделаем следующие выводы:

1) при чисто активном сопротивлении нагрузки, равном  $R$ , входное сопротивление четырехполюсника не зависит от частоты;

2) зависимость повторного затухания четырехполюсника от частоты (при  $Z_{\text{н}} = Z_{\text{пл}} = R$ ) полностью определяется частотной зависимостью сопротивления двухполюсника  $Z_{\text{а}}$ .

Подбирая в качестве  $Z_{\text{а}}$  двухполюсники с различными зависимостями сопротивления, можно получать различные частотные характеристики затухания. Необходимо отметить, что точность воспроизведения кривой затухания повышается при усложнении схем двухполюсников  $Z_{\text{а}}$  и  $Z_{\text{б}}$ .

Так как волновое ослабление однородной линии с ростом частоты увеличивается, а ослабление корректирующего четырехполюсника уменьшается, двухполюсник  $Z_{\text{а}}$  должен содержать емкость, а  $Z_{\text{б}}$  – индуктивность.

Для получения конечной величины затухания на частоте  $\omega = 0$  (так как волновое ослабление на этой частоте имеет конечное значение) в двухполюсники  $Z_{\text{а}}$  и  $Z_{\text{б}}$  включаются резисторы. Схема простейшего Г-образного четырехполюсника, предназначенного для коррекции амплитудных искажений однородной линии, приведена на рис. 7.3.

Элементы данной схемы связаны следующими соотношениями:

$$C = \frac{1}{2\pi r'_1 \sqrt{Q}}; R_1 = \frac{Rr'_1}{R + r'_1}; L = CR^2; r_2 = \frac{R^2}{r'_1}, \quad (7.7)$$

где

$$r'_1 = R \left( \sqrt{\frac{T}{Q}} - 1 \right); \quad (7.8)$$

$$Q = \frac{f_1^2(A_1 - 1) - f_2^2(A_2 - 1)}{A_2 - A_1}; \quad (7.9)$$

$$T = QA_1 + f_1^2(A_1 - 1); A_1 = e^{0,23a_{\text{к1}}}; A_2 = e^{0,23a_{\text{к2}}}; \quad (7.10)$$

$a_{\text{к1}}, a_{\text{к2}}$  – затухание корректора на частотах  $f_1$  и  $f_2$  соответственно (рис. 7.4), дБ.

Условие физической реализации элементов схемы:  $Q < T$ , если оно не выполняется, необходимо увеличить число цепочно соединенных контуров или усложнить их схему и повторить расчет. Теоретически повторное ослабление может быть рассчитано по формуле:

$$a_{\pi} = 10 \lg \frac{T + f^2}{Q + f^2}. \quad (7.11)$$

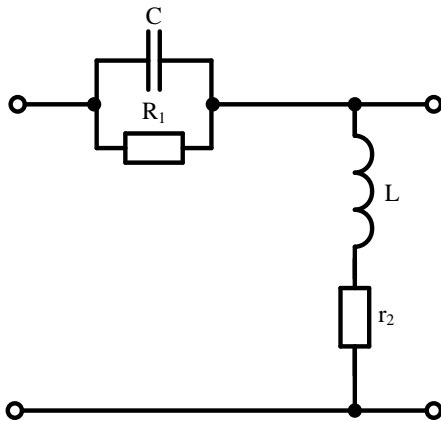


Рис. 7.3. Схема амплитудного выравнивателя

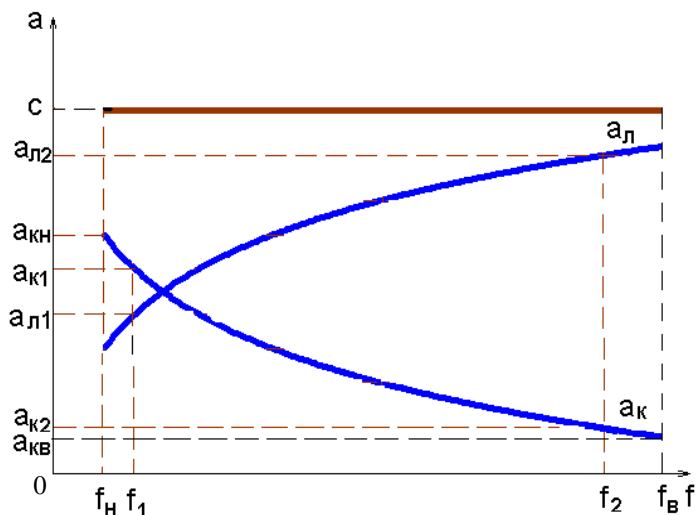


Рис. 7.4. Частотные характеристики затухания исследуемых четырехполюсников

## 7.2. Порядок выполнения работы

- 1) Ознакомиться с основными теоретическими положениями.
- 2) Оформить в виде табл. 7.1 и построить график частотной зависимости  $a_{\text{в}}(\omega)$  однородной линии, используя результаты, полученные при выполнении лабораторной работы 6.

Таблица 7.1

Частотные характеристики ослабления

Частота $f$ , Гц	Линия	Контур			
	$a_{\text{в}}$ , дБ	$P_{\text{вх}}$ , дБ	$P_{\text{вых}}$ , дБ	$a_{\text{эксп}}$ , дБ	$a_{\text{п}}$ , дБ

3) Построить графики частотной зависимости соответствующего однородной линии корректора  $a_k(\omega)$ , добиваясь устранения амплитудно-частотных искажений, т. е.  $a_b + a_v = c$ . Числовое значение  $c$  принимается таким, чтобы на верхней рабочей частоте диапазона  $f_v$  ослабление контура  $a_{k.v}$  не превышало 0,5 дБ.

4) Определить по формулам (7.7) – (7.10) элементы выравнивающего контура (ВК), отсчитав по полученным графикам для двух частот ( $f_1, f_2$ ) соответствующие значения  $a_{k.i} = c - a_{l.i}$  аналогично рис. 7.4. При расчете принять  $R$  равным модулю волнового сопротивления на средней частоте исследуемого диапазона  $f_{cp} = \sqrt{f_n f_v}$ . Если рассчитанный ВК нельзя реализовать пассивными элементами, то необходимо, увеличивая число цепочно соединяемых контуров, добиться выполнения условия  $Q < T$ .

5) Рассчитать ослабление полученного ВК по формуле (7.11).

6) Измерить с помощью лабораторного макета повторное ослабление ВК, собрав схему измерения, приведенную на рис. 7.5. При этом необходимо нагружать ВК на соответствующее повторное сопротивление, рассчитанное по формуле (7.5).

7) Результаты исследования повторного затухания ВК представить в табл. 7.1. Построить графики теоретической и экспериментальной зависимостей ослабления предложенного ВК от частоты; сделать выводы по результатам исследования.

8) Ответить на контрольные вопросы.

### 7.3. Содержание отчета

1) Графики частотной зависимости  $a_v = f(\omega)$  и требующейся характеристики выравнивающего контура  $a_k = f(\omega)$ .

2) Схема ВК, предлагаемого для коррекции амплитудно-частотных искажений, расчетные формулы и результаты расчета элементов этой схемы.

3) Схема и результаты измерений и расчетов частотной зависимости затухания предложенного контура.

4) Графики теоретической и экспериментальной зависимостей ослабления предложенного ВК от частоты.

5) Подписанный преподавателем черновик с результатами измерений.

6) Ответы на контрольные вопросы.

#### **7.4. Контрольные вопросы**

- 1) Как изменяются напряжение и ток по длине однородной бесконечно длинной цепи?
- 2) Объясните причину частотной зависимости волнового затухания.
- 3) Поясните возникновение амплитудно-частотных искажений сигналов.
- 4) Какие схемы используются в качестве амплитудных выравнивающих контуров и почему?
- 5) Какое ослабление (рабочее, вносимое, повторное, характеристическое) рассчитано теоретически и какое экспериментально?
- 6) Укажите виды искажений сигналов, возникающих в электрически короткой линии.