

**В. П. Бакалов, П. П. Воробиенко,  
Б. А. Крук, Е. А. Субботин**

# **ОСНОВЫ СИНТЕЗА ЦЕПЕЙ**

*Под редакцией профессора В. П. Бакалова*

*Рекомендовано УМО по образованию в области инфокоммуникационных технологий и систем связи в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации (степени) «бакалавр», «магистр» и «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи» квалификации «специалист»*

**Москва  
Горячая линия – Телеком  
2015**

УДК 621.373(075)

ББК 32.88

О75

Рецензенты: заслуженный деятель науки РФ, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор техн. наук, профессор *В. В. Губарев*; заслуженный деятель науки РФ, доктор техн. наук, профессор *В. Ф. Дмитриков*

Авторы: В. П. Бакалов, П. П., Воробиенко, Б. А. Крук, Е. А. Субботин

**О75 Основы синтеза цепей:** Учебное пособие для вузов / В. П. Бакалов, П. П., Воробиенко, Б. А. Крук и др.; Под редакцией В. П. Бакалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 358 с.: ил.

**ISBN 978-5-9912-0498-9.**

В пособии, предназначенном для самостоятельного изучения основных разделов теории электрических цепей, изложены основы синтеза двухполюсных и четырехполюсных линейных и нелинейных электрических цепей, аналоговых фильтров, амплитудных, фазовых и гармонических корректоров, дискретных и цифровых фильтров и оптимизация электрических цепей. Изложенная теория проиллюстрирована многочисленными примерами, позволяющими лучше усвоить теоретический материал при самостоятельном изучении этой дисциплины. В конце каждой главы приведены основные результаты и выводы, вопросы для самоконтроля и задачи для самостоятельного решения, ответы на которые представлены в конце книги. Пособие может быть использовано как при традиционных, так и дистанционных технологиях обучения.

Для студентов вузов и колледжей, обучающихся по специальностям связи и информатики.

**ББК 32.88**

Адрес издательства в Интернет [WWW.TECHBOOK.RU](http://WWW.TECHBOOK.RU)

ISBN 978-5-9912-0498-9

© В. П. Бакалов, П. П., Воробиенко,  
Б. А. Крук, Е. А. Субботин, 2015

© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2015

## Предисловие

Дисциплина основы теории цепей (ОТЦ) является базовым курсом при подготовке бакалавров, магистров по направлениям «Телекоммуникации», «Радиотехника», а также инженеров по специальностям связи.

ОТЦ базируется, как известно, на двух «китах» – анализе и синтезе. В большинстве изданий учебно-методической литературы по ОТЦ вопросам синтеза уделяется значительно меньше внимания, чем вопросам анализа, несмотря на то, что синтез электрических цепей является важной составной частью теории электрических цепей, роль которой постоянно возрастает в связи с внедрением современных технологий: микроэлектроники, нанотехнологий, интернет-технологий и др.

Большинство материалов, посвященных тем или иным вопросам синтеза, распродоточено по многочисленным изданиям применительно к проектированию различных систем и устройств радиотехники и электроники, что особенно затрудняет самостоятельное изучение этой важной части ОТЦ. А если учесть, что задачи синтеза по своей сути значительно сложнее задач анализа, то необходимость издания учебного пособия, посвященного систематизированному изложению вопросов синтеза электрических цепей в тесной увязке с задачами анализа становится особенно актуальной.

Представленное учебное пособие посвящено синтезу линейных и нелинейных двухполосников и четырехполосников как основе синтеза более сложных устройств (аналоговых и цифровых фильтров, амплитудных и фазовых корректоров, автогенераторов и др.), а также оптимизации электрических цепей.

Учебное пособие состоит из 10 глав, в которых рассматриваются общие характеристики двухполосных (гл. 1) и четырехполосных цепей (гл. 2), основные задачи и этапы синтеза, условие физической реализуемости передаточных, временных и входных функций (гл. 3), синтез  $LC$ ,  $RL$ ,  $RC$  и  $RLC$ -двухполосников (гл. 4), синтез четырехполосных цепей с помощью различных мостовых и лестничных схем и ARC-цепей (гл. 5), синтез нелинейных двухполосников и четырехполосников (гл. 6), синтез аналоговых пассивных и активных фильтров (гл. 7), амплитудных, фазовых и гармонических корректоров (гл. 8), дискретных и цифровых фильтров (гл. 9), а также вопросы оптимизации электрических цепей (гл. 10).

Учитывая назначение учебного пособия и структуру предшествующего ему издания «Основы анализа цепей»\*, изложенная теория проиллюстрирована многочисленными примерами, позволяющими лучше усвоить теоретический материал при самостоятельном изучении этой дисциплины. В конце каждой главы приведены основные результаты и выводы, вопросы для самоконтроля и задачи для самостоятельного решения, ответы на которые представлены в конце книги.

Для удобства использования книга снабжена предметным указателем.

В подготовке учебного пособия большую помощь оказали авторам сотрудники кафедры ТЭЦ Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), и в частности, ст. преподаватель Гусельникова Н.М., которым авторы выражают глубокую благодарность.

\* Бакалов В.П., Журавлева О.Б., Крук Б.И. Основы анализа цепей: учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013 – 592 с.

# Глава 1. Общая характеристика двухполюсных цепей

## 1.1. Двухполюсники. Классификация двухполюсников

*Двухполюсником* называют электрическую цепь с двумя зажимами, через которые она обменивается электрической энергией с внешними цепями (рис. 1.1).

Существуют различные типы двухполюсников: активные и пассивные, линейные и нелинейные, реактивные ( $LC$ ) и двухполюсники общего вида ( $R, L, C$ ). Активные двухполюсники в свою очередь могут быть автономными или неавтономными. В неавтономных двухполюсниках ток и напряжение на внешних зажимах при включении его в пассивную цепь будут равны нулю. В автономных же двухполюсниках ток и (или) напряжение на его зажимах не равны нулю. Примером автономного двухполюсника является генератор напряжения или тока, рассматриваемый относительно выходных зажимов.

Свойства любого линейного пассивного или неавтономного активного двухполюсника полностью определяется его функцией входного сопротивления  $Z(j\omega)$  или функцией входной проводимости  $Y(j\omega)$ .

Двухполюсники называются *эквивалентными*, если они обладают одинаковыми входными функциями.

Двухполюсники называются *обратными*, если они удовлетворяют условию

$$Z_a(j\omega)Z_b(j\omega) = R_0^2, \quad (1.1)$$

где  $R_0$  – некоторое постоянное сопротивление.

Правило получения обратных двухполюсников базируется на принципе дуальности [1]: последовательное соединение в исходном двухполюснике заменяется параллельным соединением дуальных элементов в обратном двухполюснике, и наоборот параллельное соединение в исходном двухполюснике заменяется последовательным соединением дуальных элементов в обратном двухполюснике.

### Пример 1.1

Задан двухполюсник (рис. 1.2, а). Построить обратный ему двухполюсник.

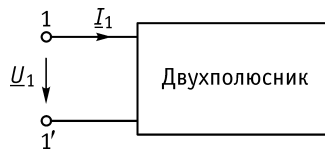


Рис. 1.1. Двухполюсник

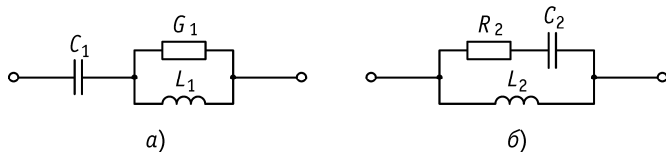


Рис. 1.2. Исходный (а) и обратный (б) двухполюсники

В соответствии с правилом получения обратных двухполюсников параллельное соединение  $G_1$  и  $L_1$  заменяется последовательным соединением дуальных элементов  $R_2$  и  $C_2$ , а последовательное соединение  $C_1$  параллельным соединением  $L_2$ . Полученный обратный двухполюсник, изображен на (рис. 1.2, б).

Параметры элементов  $R_2, C_2, L_2$  определяются из условия (1.1):

$$R_2 = R_0^2 / R_1; \quad C_2 = L_1 / R_0^2; \quad L_2 = R_0^2 C_1.$$

При синтезе цепей часто вместо комплексных входных функций  $Z(j\omega)$  и  $Y(j\omega)$  рассматриваются операторные входные функции  $Z(p)$  и  $Y(p)$ , получаемые заменой в исходных функциях  $j\omega$  на  $p$ .

В теории цепей [1] доказывается, что входные функции  $Z(p)$  и  $Y(p)$  пассивного двухполюсника, содержащего конечное число сосредоточенных элементов, можно представить в виде взаимобратных дробно-рациональных функций с вещественными коэффициентами вида:

$$Z(p) = \frac{1}{Y(p)} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0} = \frac{N(p)}{M(p)}. \quad (1.2)$$

Причем, можно показать [1, 2], что для любых линейных двухполюсников степени  $n$  и  $m$  либо равны, либо отличаются не более чем на единицу.

## 1.2. Параметры и функции двухполюсных цепей

Основные параметры и функции двухполюсников и четырехполюсников обычно определяются через *энергетические функции цепи*. Энергетические функции цепи могут быть получены из системы уравнений контурных токов или узловых напряжений. Например, при использовании метода контурных токов в операторной форме система уравнений будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n Z_{ki}(p) I_i(p) = U_k(p), \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (1.3)$$

где

$$Z_{kk}(p) = R_{kk} + pL_{kk} + \frac{1}{pC_{kk}} \quad (1.4)$$

– собственное сопротивление  $k$ -го контура;