

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)

---

З. В. Зайцева, Н. К. Логвинова,  
В. В. Сергеев, Д. В. Шушпанов

# ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Часть 1

*КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ*

Разделы 4 и 5

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2018

УДК 621.3.011.7(078.5)  
ББК 32.88-01я73  
3-17

Рецензенты:  
доктор технических наук,  
профессор кафедры электроники и схемотехники СПбГУТ  
*В. А. Филин,*  
доктор технических наук,  
профессор кафедры теоретических основ электротехники  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова-Ленина  
*Е. Б. Соловьева*

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ  
в качестве учебного пособия*

**Зайцева, З. В.**

3-17 Теория электрических цепей. Часть 1. Контрольно-измерительные материалы. Разделы 4 и 5 : учебное пособие / З. В. Зайцева, Н. К. Логвинова, В. В. Сергеев, Д. В. Шушпанов ; СПбГУТ. – СПб., 2018. – 43 с.

Содержит теоретический материал в виде алгоритмов, формул, определений, тесты и методические указания по их выполнению, контрольные вопросы, литературу по дисциплинам «Теория электрических цепей. Часть 1», «Электротехника и электроника».

Предназначено для повышения эффективности дистанционного обучения с использованием виртуальной обучающей среды «Moodle», для организации самостоятельной работы студентов очной и вечерней форм обучения по направлениям 10.03.01 «Радиотехника», 10.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.04 «Управление в технических системах», а также при подготовке специалистов по специальности 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи».

**УДК 621.3.011.7(078.5)  
ББК 32.88-01я73**

© Зайцева З. В., Логвинова Н. К., Сергеев В. В.,  
Шушпанов Д. В., 2018

© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
4. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ .....	6
4.1. Комплексные передаточные функции электрических цепей. Частотные характеристики .....	6
4.2. Резонанс в колебательных контурах. Частотные характеристики последовательного и параллельного колебательных контуров .....	9
Тесты .....	16
Контрольные вопросы .....	27
5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ .....	28
5.1. Четырехполюсники и их классификация .....	28
5.2. Уравнения передачи, параметры и матрицы параметров четырехполюсников .....	29
5.3. Соединения четырехполюсников .....	32
Тесты .....	33
Контрольные вопросы .....	41
Список литературы .....	42

## ВВЕДЕНИЕ

Предназначено для студентов, обучающихся по дисциплинам «Теория электрических цепей. Часть 1», «Электротехника и электроника» и подготовлено в соответствии с действующей программой.

Учебное пособие разработано в целях повышения эффективности дистанционного обучения с использованием виртуальной обучающей среды «Moodle».

Контрольно-измерительные материалы могут использоваться студентами очной и вечерней форм обучения для организации самостоятельной работы над указанными выше дисциплинами и углубленного их изучения. Для этого в университете обеспечен доступ студентов к обучающей среде «Moodle» в кафедральных компьютерных классах.

Учебное пособие дает возможность студенту в удобном для него формате времени и места проработать и усвоить теоретический материал, который позволит грамотно ответить на вопросы тестов в режиме контроля и получить лучшие результаты.

В данном пособии представлены разделы 4 и 5 первой части дисциплины ТЭЦ, в которых рассматриваются частотные характеристики ЭЦ, основы теории четырехполюсников.

Каждый раздел состоит из теоретической части, контрольно-измерительных материалов в форме тестов и контрольных вопросов.

Теоретический материал приведен в сжатой форме и частично для наглядности представлен таблицами, содержащими схемы, временные и векторные диаграммы, формулы расчета параметров и характеристик ЭЦ.

Для всех методов анализа ЭЦ приведены алгоритмы расчета цепей. Показаны примеры решения типовых задач, которые помогут студенту выполнить тестовые задания.

Контрольные тесты составлены из вопросов и ответов с учетом специфики раздела и содержат не только текстовый материал, но и схемы ЭЦ, формулы, временные, векторные диаграммы и графики.

На каждый вопрос теста даны 4 варианта ответа. Форма ответа – выборочная: а, б, в, г, однако правильным может быть не только один ответ, но и несколько. При этом на правильность конструируемого ответа не влияет порядок ввода букв, обозначающих правильные ответы.

Форма ответов различна:

- текстовый материал в виде определений, законов, теорем;
- формулы расчета параметров и характеристик ЭЦ;
- математические выражения законов, функций, уравнений;
- числовые значения искомых величин, которые должны быть получены в результате выполнения нескольких этапов решения задач;
- графики и диаграммы;

– схемы ЭЦ.

Количество тестов варьируется от 36 до 67 в зависимости от объема изучаемого в разделах 4 и 5 материала.

Каждый раздел заканчивается контрольными вопросами. При подготовке к ответам на них студент может оценить свой уровень знаний и степень подготовленности как к текущему, так и к итоговому контролю – теоретическому зачету.

При организации дистанционного обучения в институте непрерывного образования в целях более детального изучения учебного материала четвертый раздел дисциплины разбит на два подраздела, а пятый – на три.

При работе в виртуальной обучающей среде «Moodle» в режиме обучения студент может выбрать любой раздел (подраздел) в соответствии с рабочей программой, представленной на сайте университета. В программе имеется тренировочный режим сдачи тестов, где не выставляется итоговая оценка, но показываются результаты ответов на каждый тест с демонстрацией правильного ответа. При такой форме работы с программой имеются ограничения на количество попыток студента.

Данное учебное пособие позволит студенту детально проработать учебный материал без каких-либо временных ограничений, проверить свои знания на компьютере в режиме обучения и, получив хорошие результаты, перейти в режим контроля.

## 4. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Комплексные передаточные функции электрических цепей. Частотные характеристики. Резонанс в колебательных контурах. Частотные характеристики последовательного и параллельного колебательных контуров.

### 4.1. Комплексные передаточные функции электрических цепей. Частотные характеристики

Передача электрических сигналов в системах связи описывается с помощью передаточных функций цепи. Одной из важнейших среди них является комплексная передаточная функция. Комплексной передаточной функцией  $H(j\omega)$  называется отношение комплексных амплитуд реакции к воздействию в четырехполюснике (рис. 4.1), т. е. отношение комплексных амплитуд напряжения или тока на выходе цепи к комплексным амплитудам напряжения или тока на входе цепи.

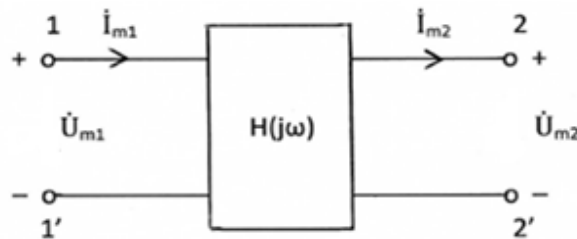


Рис. 4.1

Для четырехполюсника возможны четыре равноправных варианта комплексных передаточных функций:

$$\begin{aligned}
 H_u(j\omega) &= \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} e^{j(\psi_{u2} - \psi_{u1})}; \\
 H_i(j\omega) &= \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{I_{m2}}{I_{m1}} e^{j(\psi_{i2} - \psi_{i1})}; \\
 H_z(j\omega) &= \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} = \frac{U_{m2}}{I_{m1}} e^{j(\psi_{u2} - \psi_{i1})}, \text{ Ом}; \\
 H_Y(j\omega) &= \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} = \frac{I_{m2}}{U_{m1}} e^{j(\psi_{i2} - \psi_{u1})}, \frac{1}{\text{Ом}}.
 \end{aligned}$$

В этих выражениях отношения амплитуд реакции и воздействия представляют собой модули комплексных передаточных функций –  $|H(j\omega)|$ , а разность фаз реакции и воздействия – аргументы комплексных передаточных функций –  $\Theta(\omega)$ .

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) называется частотная зависимость отношения амплитуды реакции к амплитуде воздействия. Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) называется частотная зависимость разности фаз реакции и воздействия.

Таким образом, комплексную передаточную функцию можно представить в виде

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{j\Theta(\omega)},$$

где модуль  $|H(j\omega)|$  дает математическое выражение для АЧХ, а аргумент  $\arg H(j\omega) = \Theta(\omega)$  – математическое выражение для ФЧХ.

Если известна АЧХ цепи, то можно найти амплитуду реакции как произведение амплитуды воздействия на значение АЧХ на заданной частоте. Начальная фаза реакции определяется как сумма начальной фазы воздействия и значения ФЧХ на заданной частоте.

Избирательные свойства цепей определяются полосой пропускания.

У цепей, содержащих один реактивный элемент  $L$  или  $C$  (цепей первого порядка) АЧХ изменяется монотонно и достигает максимального значения при  $\omega = 0$  или  $\omega \rightarrow \infty$ .

Полоса пропускания таких цепей – это диапазон частот, в пределах которого АЧХ цепи уменьшается не более чем в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с ее максимальным значением. Граничную частоту  $\omega_{гр}$  полосы пропускания цепи определяют из соотношения

$$|H(j\omega_{гр})| = \frac{|H(j\omega)|_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

### Пример

Для цепи, показанной на рис. 4.2, а, найти выражения для комплексных передаточных функций  $H_1(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ ,  $H_2(j\omega) = \frac{i_2}{i_1}$  и соответствующих АЧХ и ФЧХ. Построить графики АЧХ и ФЧХ. Параметры цепи:  $R = 100 \text{ Ом}$ ,  $C = 5 \text{ нФ} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ .

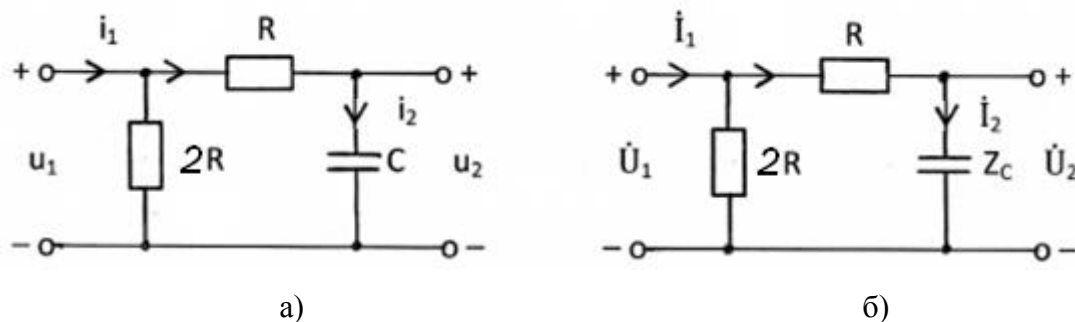


Рис. 4.2

*Решение*

Переходим к схеме замещения цепи для комплексных действующих значений токов и напряжений (рис. 4.2, б):

$$i(t) \rightarrow \dot{I}; \quad u(t) \rightarrow \dot{U}; \quad R \rightarrow Z_R = R; \quad C \rightarrow Z_C = \frac{1}{j\omega C}.$$

1. Найдем  $H_1(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ .

Комплексная реакция определяется по закону Ома  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot Z_C$ .

Комплексное воздействие находится по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} -\dot{U}_1 + \dot{I}_2 R + \dot{I}_2 Z_C &= 0; \\ \dot{U}_1 &= \dot{I}_2 (R + Z_C). \end{aligned}$$

Тогда

$$H_1(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z_C}{R + Z_C} = \frac{1}{1 + j\omega CR}.$$

Определим АЧХ

$$|H_1(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

и ФЧХ

$$\theta_1(\omega) = -\text{arctg } \omega CR.$$

Найдем граничную частоту полосы пропускания:

$$|H_1(j\omega_{\text{гр}})| = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{\text{гр}} RC)^2}}; \quad 1 + (\omega_{\text{гр}} RC)^2 = 2; \quad \omega_{\text{гр}} = \frac{1}{RC};$$

$$\theta_1(\omega_{\text{гр}}) = -\text{arctg } \omega_{\text{гр}} CR = -\text{arctg} 1 = -45^\circ.$$

На рис. 4.3 приведены графики АЧХ и ФЧХ, рассчитанные по последним формулам.

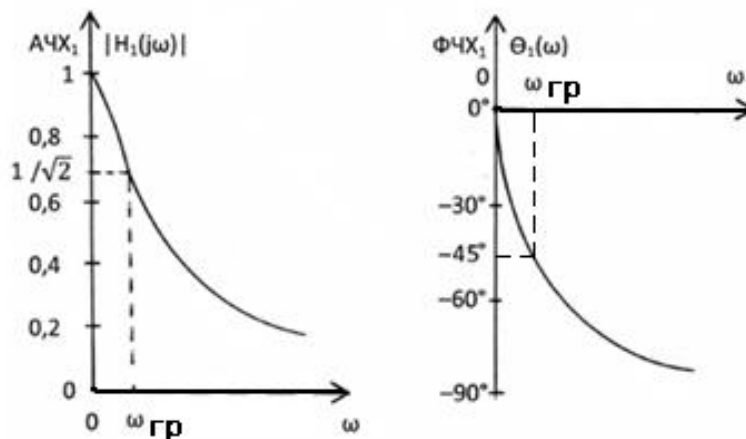


Рис. 4.3

2. Найдем  $H_2(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$ :

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \frac{2R}{2R + R + Z_C} = \dot{I}_1 \frac{j2\omega CR}{1 + j3\omega CR};$$



$$H_2(j\omega) = \frac{j2\omega CR}{1+j3\omega CR}.$$

Определим АЧХ

$$|H_2(j\omega)| = \frac{2\omega CR}{\sqrt{1+(3\omega RC)^2}},$$

и ФЧХ

$$\theta_2(\omega) = \arctg \frac{2\omega CR}{0} - \arctg \frac{3\omega CR}{1} = \frac{\pi}{2} - \arctg 3\omega CR.$$

Найдем граничную частоту полосы пропускания:

$$|H_2(j\omega_{гр})| = \frac{2}{3\sqrt{2}} = \frac{2\omega_{гр}CR}{\sqrt{1+(3\omega_{гр}RC)^2}};$$

$$2^2 \cdot (1 + (3\omega_{гр}RC)^2) = (3\sqrt{2})^2 \cdot (2\omega_{гр}RC)^2; \quad \omega_{гр} = \frac{1}{3RC};$$

$$\theta_2(\omega_{гр}) = \frac{\pi}{2} - \arctg 3\omega_{гр}CR = \frac{\pi}{2} - \arctg 1 = 45^\circ.$$

На рис. 4.4 показаны графики АЧХ и ФЧХ, рассчитанные по приведенным выше формулам.

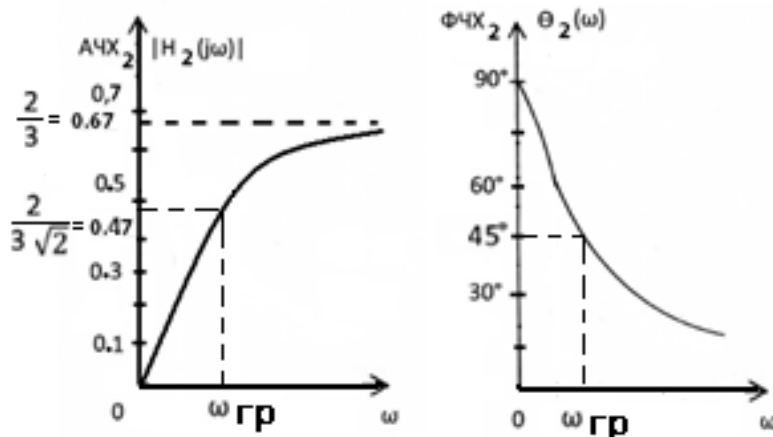


Рис. 4.4

## 4.2. Резонанс в колебательных контурах.

### Частотные характеристики последовательного и параллельного колебательных контуров

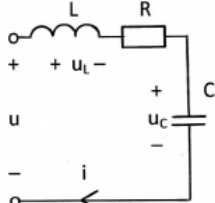
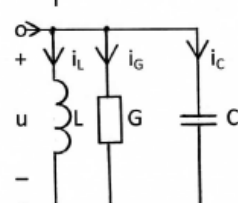
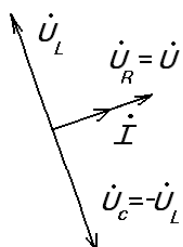
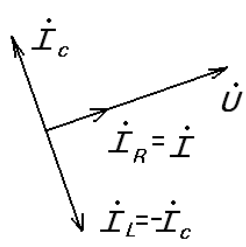
Колебательные контуры широко применяются для усиления и селекции сигналов в устройствах связи, в частности, в электрических фильтрах. Частотно-избирательное усиление в контурах наблюдается в режиме резонанса.

Явление значительного возрастания амплитуды гармонической реакции по мере приближения частоты внешнего гармонического воздействия

к частоте собственных незатухающих колебаний контура  $\omega_0$  называется явлением резонанса. При резонансе в цепи, содержащей реактивные элементы  $L$  и  $C$ , ток совпадает по фазе с напряжением на зажимах цепи, так как  $\varphi|_{\omega=\omega_0} = 0$ , где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – резонансная частота контура. Цепи, в которых возникает режим резонанса, называют колебательными (резонансными) контурами.

Канонические схемы последовательного и параллельного колебательных контуров, основные величины, характеризующие резонансные явления в них, а также векторные диаграммы приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные величины	Последовательный колебательный контур	Параллельный колебательный контур
Каноническая схема контура		
	$Z(j\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$Y(j\omega) = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$
Условие резонанса	$\text{Im}Z(j\omega_0) = 0;$ $\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0;$ $\varphi_Z = 0$	$\text{Im}Y(j\omega_0) = 0;$ $\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} = 0;$ $\varphi_Y = 0$
Резонансная частота	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	
Резонансное сопротивление контура	$Z(j\omega_0) = R$	$Z(j\omega_0) = \frac{1}{G}$
Добротность контура при частоте $\omega = \omega_0$	$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$	$Q = \frac{I_C}{I} = \frac{I_L}{I} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 LG}$
Полоса пропускания	$2\Delta\omega^* = \omega_1 - \omega_{-1} = \frac{\omega_0}{Q}; 2\Delta f^* = f_1 - f_{-1} = \frac{f_0}{Q}$	
Векторная диаграмма токов и напряжений на резонансной частоте	 <p style="text-align: center;">Резонанс напряжений</p>	 <p style="text-align: center;">Резонанс токов</p>

На резонансной частоте сопротивление индуктивности равно сопротивлению емкости по абсолютной величине. Это сопротивление называется характеристическим (волновым) сопротивлением контура:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho.$$

В последовательном колебательном контуре возникает резонанс напряжений, при котором гармонические напряжения на индуктивности и емкости на резонансной частоте компенсируют друг друга.

Амплитуды колебаний напряжений на зажимах реактивных элементов могут значительно превышать амплитуду напряжения на входе цепи. Отношение этих амплитуд называется добротностью контура:

$$\left. \frac{U_{mL}}{U_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \left. \frac{U_{mC}}{U_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = Q.$$

В параллельном колебательном контуре возникает резонанс токов, при котором токи через индуктивность и емкость на резонансной частоте компенсируют друг друга.

Отношение амплитуд токов в реактивных элементах контура и тока источника характеризует добротность контура

$$Q = \left. \frac{I_{mC}}{I_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \left. \frac{I_{mL}}{I_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 LG}.$$

Значения добротности  $Q$  последовательных и параллельных  $LC$ -колебательных контуров могут достигать до нескольких сотен единиц.

При анализе последовательного и параллельного контуров целесообразно использовать принцип дуальности.

Избирательные свойства колебательного контура можно охарактеризовать полосой пропускания. В технике радиосвязи полосу частот  $\omega_{-1} \leq \omega \leq \omega_1$ , в пределах которой значения резонансной амплитудно-частотной характеристики составляют не менее чем  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7071$  ее максимального значения, принято называть полосой пропускания:

$$2\Delta\omega^* = \omega_1 - \omega_{-1} = \frac{\omega_0}{Q};$$

для циклической частоты

$$2\Delta f^* = f_1 - f_{-1} = \frac{f_0}{Q}.$$

Для анализа частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) последовательного колебательного контура необходимо рассмотреть соответствующие комплексные передаточные функции (табл. 4.2):

– резонансная характеристика

$$H(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}};$$

– частотная зависимость отношения напряжения на емкости к входному напряжению контура

$$H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}};$$

– частотная зависимость отношения напряжения на индуктивности к входному напряжению контура

$$H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}}.$$

Таблица 4.2

Комплексная передаточная функция	Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики
$H(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}} = \frac{j\frac{\omega}{L}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$ H(j\omega)  = \frac{\frac{\omega}{L}}{\sqrt{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC}\right)^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}};$ $\theta(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
$H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} = \frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$ H_C(j\omega)  = \frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC}\right)^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}};$ $\theta_C(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
$H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$ H_L(j\omega)  = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC}\right)^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}};$ $\theta_C(\omega) = \pi - \operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$

Выражения для комплексных передаточных функций, АЧХ и ФЧХ параллельного контура дуальны соответствующим выражениям в табл. 4.2. Структура формул сохраняется, изменяются только переменные и параметры, как показано в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Последовательный контур	Параллельный контур
$H(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}}$	$H(j\omega) = \frac{\dot{U}}{i} = \frac{j\frac{\omega}{C}}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}};$ $ H(j\omega)  = \frac{\frac{\omega}{C}}{\sqrt{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC}\right)^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}};$ $\theta(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
$H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}}$	$H_L(j\omega) = \frac{\dot{i}_L}{i} = \frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}};$ $ H_L(j\omega)  = \frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC}\right)^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}};$ $\theta_L(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
$H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}}$	$H_C(j\omega) = \frac{\dot{i}_C}{i} = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}};$ $ H_C(j\omega)  = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC}\right)^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}};$ $\theta_C(\omega) = \pi - \operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$

### Пример

Для последовательного колебательного контура, схема которого показана на рис. 4.5, а, рассчитать его параметры: резонансную частоту  $\omega_0$ , характеристическое сопротивление  $\rho$ , добротность  $Q$ , а также  $U$  и  $U_C(\omega_0)$ , если  $R = 400 \text{ Ом}$ ,  $C = 200 \text{ пФ}$ ,  $L = 800 \text{ мкГн}$ ,  $I(\omega_0) = 5 \text{ мА}$ .

Найти комплексную передаточную функцию  $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}}$  (рис. 4.5, б).

Определить его полосу пропускания  $2\Delta f^* = f_1 - f_{-1} = \frac{f_0}{Q}$  и построить графики АЧХ и ФЧХ.

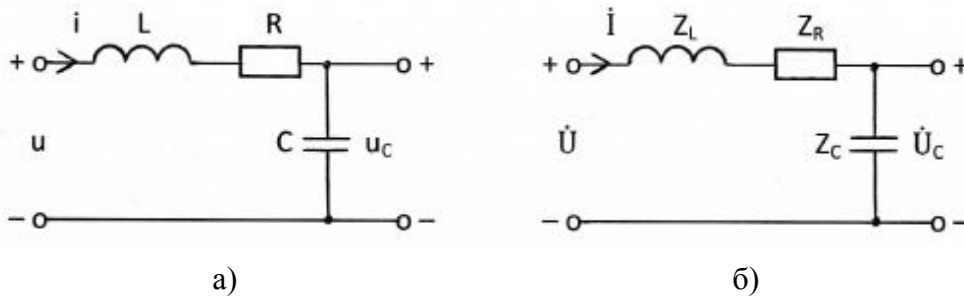


Рис. 4.5

*Решение*

Резонансная частота последовательного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 0,398 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Характеристическое сопротивление контура, т. е. сопротивление любого из реактивных элементов контура на резонансной частоте,

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = 2,5 \cdot 10^6 \cdot 800 \cdot 10^{-6} = 2000 \text{ Ом.}$$

Добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{2000}{400} = 5.$$

Действующее значение напряжения  $U$  на входе контура определяется из условия, что на резонансной частоте  $\omega_0$  сопротивление контура  $Z(j\omega_0) = R$ , а действующее значение тока  $I(\omega_0)$  задано и равно 5 мА:

$$U = Z(j\omega_0) \cdot I(\omega_0) = 400 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 2 \text{ В.}$$

Действующее значение напряжения на емкости на резонансной частоте в  $Q$  раз больше действующего значения напряжения на входе контура:

$$U_C(\omega_0) = U \cdot Q = 2 \cdot 5 = 10 \text{ В.}$$

Переходим к комплексной схеме замещения цепи (рис. 4.5, б):

$$i(t) \rightarrow \dot{I}, u(t) \rightarrow \dot{U}, R \rightarrow Z_R = R, L \rightarrow Z_L = j\omega L, C \rightarrow Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}.$$

Находим комплексную передаточную функцию  $H(j\omega) = \dot{U}_C / \dot{U}$ :

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot (Z_L + Z_R + Z_C) = \dot{I} \cdot (j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}); \dot{U}_C = \dot{I} \cdot \frac{1}{j\omega C};$$

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)} = \frac{Z_C}{Z_L + Z_R + Z_C} = \frac{1}{j\omega C(j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{1}{-\omega^2 LC + 1 + j\omega CR}.$$

Определим АЧХ

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}}$$

и ФЧХ

$$\Theta(\omega) = -\arctg \frac{\omega CR}{1-\omega^2 LC}.$$

На рис. 4.6 показан график АЧХ для заданной  $H(j\omega)$ .

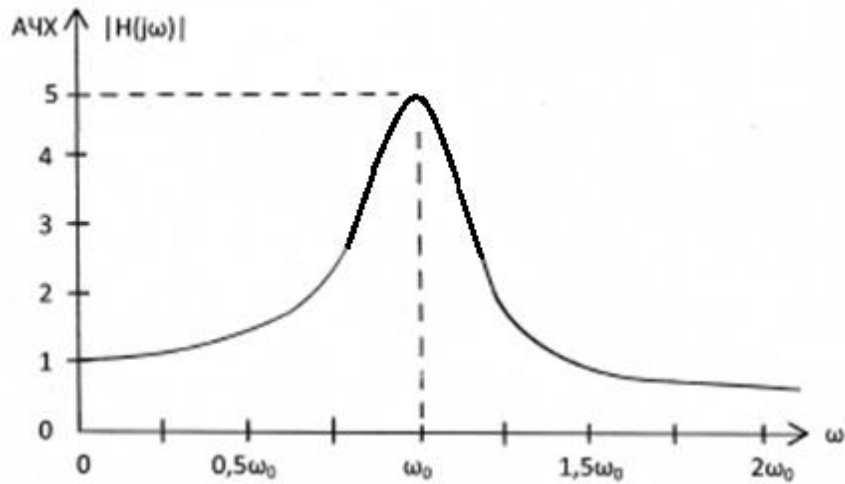


Рис. 4.6

На рис. 4.7 показан график ФЧХ.

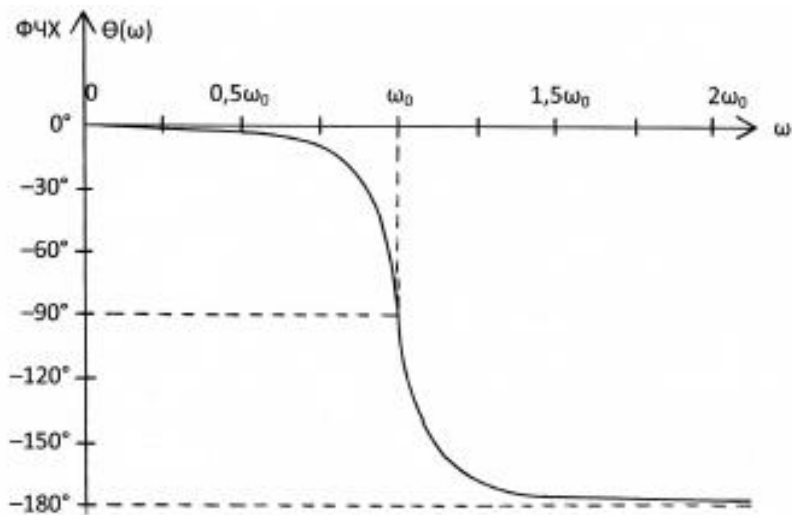


Рис. 4.7

АЧХ колебательного контура на графике рис. 4.6 изменяется немонотонно. Резко выраженную неравномерность амплитудно-частотной характеристики можно использовать для селективного (избирательного) выделения частотных составляющих сигнала вблизи резонансной частоты  $\omega_0$

и одновременно подавления сигналов, рабочие частоты которых удалены от  $\omega_0$ . Количественно избирательные свойства колебательного контура определяются его полосой пропускания.

В рассматриваемом примере

$$2\Delta f^* = f_1 - f_{-1} = \frac{f_0}{Q} = 0,398 \cdot 10^6 / 5 = 0,0796 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 79,6 \text{ кГц.}$$

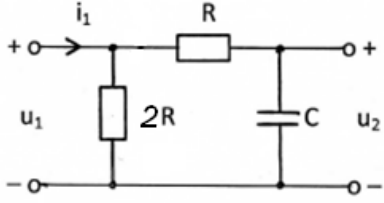
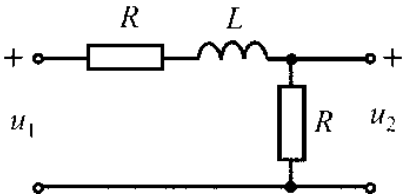
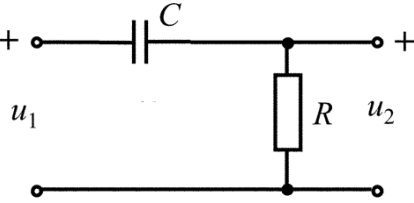
## Тесты

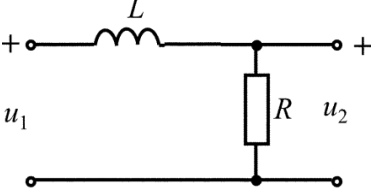
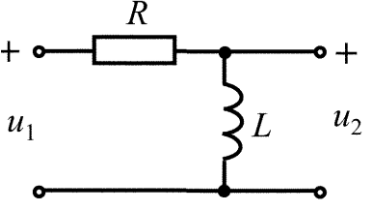
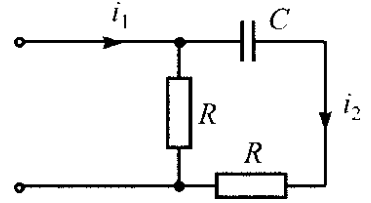
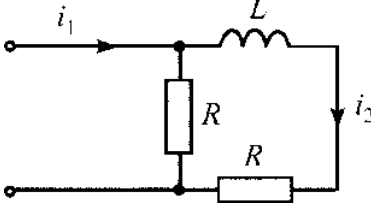
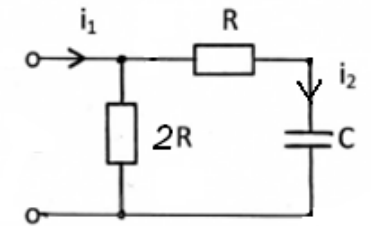
После разбора решения типовых задач предлагается выполнить тесты (табл. 4.4).

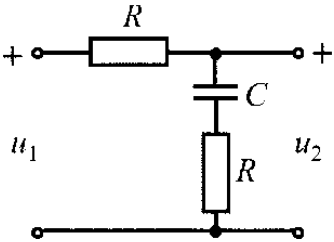
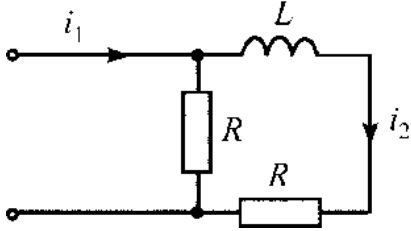
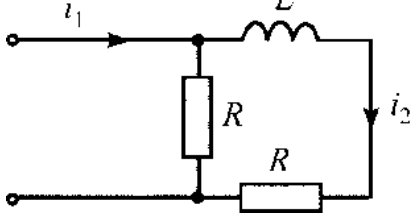
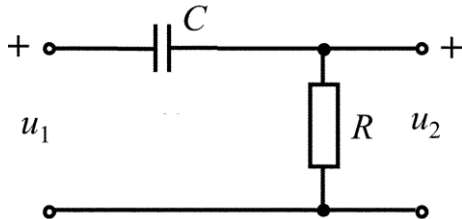
Таблица 4.4

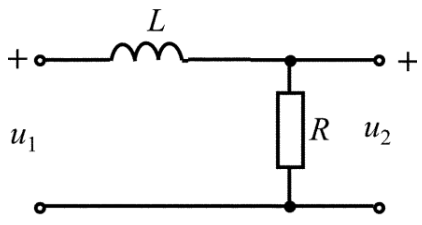
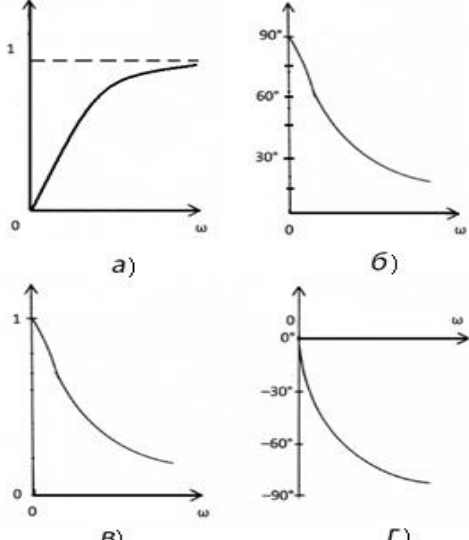
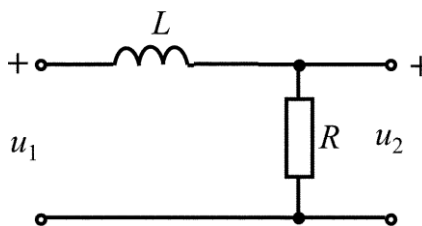
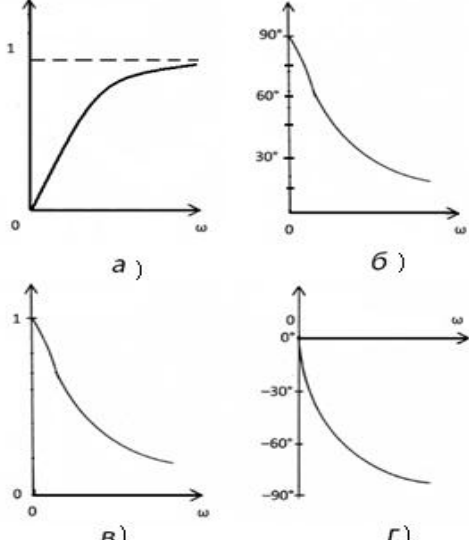
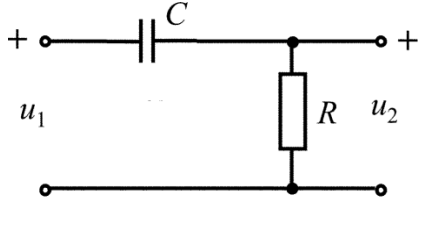
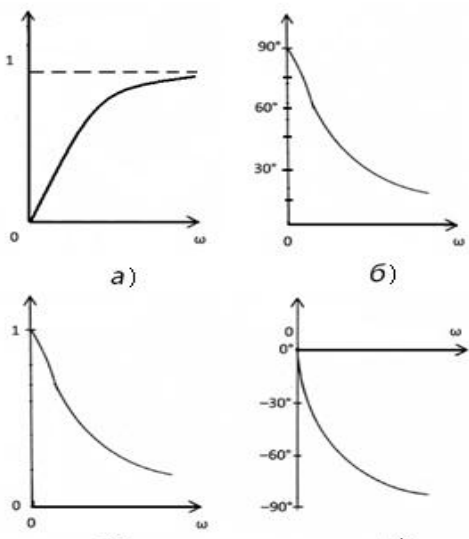
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
1	Комплексной передаточной функцией $H(j\omega)$ называется	а) отношение комплексных амплитуд напряжения или тока на выходе цепи к комплексным амплитудам напряжения или тока на входе цепи; б) отношение комплексных амплитуд напряжения или тока на входе цепи к комплексным амплитудам напряжения или тока на выходе цепи; в) отношение комплексной амплитуды воздействия к комплексной амплитуде реакции в четырехполюснике; г) отношение комплексной амплитуды реакции к комплексной амплитуде воздействия в четырехполюснике
2	Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) называется	а) частотная зависимость разности фаз реакции и воздействия; б) частотная зависимость отношения амплитуд реакции и воздействия; в) аргумент комплексной передаточной функции $H(j\omega)$ ; г) модуль комплексной передаточной функции $H(j\omega)$
3	Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) называется	а) частотная зависимость разности фаз реакции и воздействия; б) частотная зависимость отношения амплитуд реакции и воздействия; в) аргумент комплексной передаточной функции $H(j\omega)$ ; г) модуль комплексной передаточной функции $H(j\omega)$

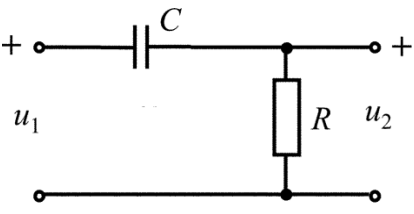
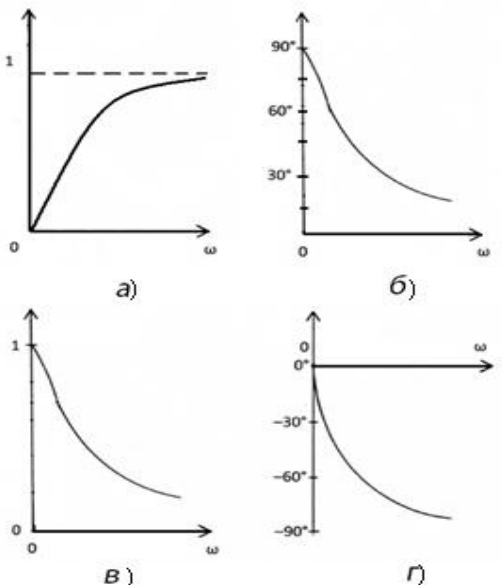
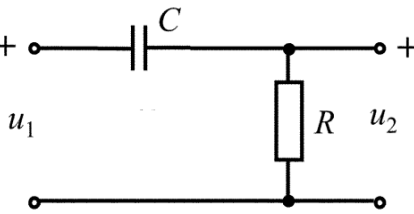
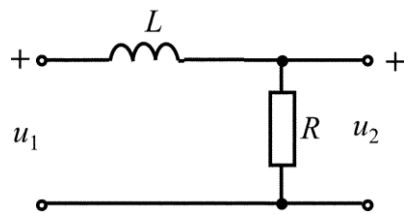
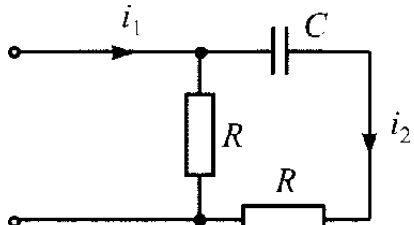


№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
4	Если известна АЧХ цепи, то амплитуду реакции можно найти как	а) сумму амплитуды воздействия и значения АЧХ на заданной частоте; б) разность амплитуды воздействия и значения АЧХ на заданной частоте; в) произведение амплитуды воздействия на значение АЧХ на заданной частоте; г) частное амплитуды воздействия и значения АЧХ на заданной частоте
5	Если известна ФЧХ цепи, то начальная фаза реакции может быть найдена как	а) сумма начальной фазы воздействия и значения ФЧХ на заданной частоте; б) разность начальной фазы воздействия и значения ФЧХ на заданной частоте; в) произведение начальной фазы воздействия на значение ФЧХ на заданной частоте; г) частное начальной фазы воздействия и значения ФЧХ на заданной частоте
6	Для данной цепи $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ будет иметь вид 	а) $\frac{1}{1+j2\omega CR}$ ;    б) $\frac{1}{1+j\omega CR}$ ; в) $\frac{j\omega CR}{1+j\omega CR}$ ;    г) $\frac{j\omega CR}{1+j2\omega CR}$
7	Для данной цепи $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ будет иметь вид 	а) $\frac{1}{R+j\omega L}$ ;    б) $\frac{R}{R+j\omega L}$ ; в) $\frac{R}{2R+j\omega L}$ ;    г) $\frac{2R}{2R+j\omega L}$
8	Для данной цепи $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ будет иметь вид 	а) $\frac{jR\omega C}{1+j2R\omega C}$ ;    б) $\frac{jR\omega C}{1+jR\omega C}$ ; в) $\frac{j2R\omega C}{1+jR\omega C}$ ;    г) $\frac{jR\omega C}{4+j2R\omega C}$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
9	<p>Для данной цепи <math>H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{j\omega L}{R+j\omega L}</math>; б) <math>\frac{jR\omega L}{R+j\omega L}</math>; в) <math>\frac{jR\omega L}{2R+j\omega L}</math>; г) <math>\frac{R}{R+j\omega L}</math></p>
10	<p>Для данной цепи <math>H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{j\omega L}{R+j\omega L}</math>; б) <math>\frac{jR\omega L}{R+j\omega L}</math>; в) <math>\frac{jR\omega L}{2R+j\omega L}</math>; г) <math>\frac{R}{R+j\omega L}</math></p>
11	<p>Для данной цепи <math>H(j\omega) = \frac{i_2}{i_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{j\omega CR}{2+j\omega CR}</math>; б) <math>\frac{j\omega CR}{1+j\omega CR}</math>; в) <math>\frac{j\omega CR}{1+j2\omega CR}</math>; г) <math>\frac{j\omega CR}{1+j3\omega CR}</math></p>
12	<p>Для данной цепи <math>H(j\omega) = \frac{i_2}{i_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{R}{R+j\omega L}</math>; б) <math>\frac{2R}{R+j\omega L}</math>; в) <math>\frac{R}{2R+j\omega L}</math>; г) <math>\frac{R}{R+j2\omega L}</math></p>
13	<p>Для данной цепи <math>H(j\omega) = \frac{i_2}{i_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{j2\omega CR}{1+j\omega CR}</math>; б) <math>\frac{j\omega CR}{1+j3\omega CR}</math>; в) <math>\frac{j2\omega CR}{1+j3\omega CR}</math>; г) <math>\frac{j2\omega CR}{3+j3\omega CR}</math></p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
14	<p>Для данной цепи <math>H(j\omega) = \frac{\dot{u}_2}{\dot{u}_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{2+jR\omega C}{1+j2R\omega C}</math>; б) <math>\frac{1+jR\omega C}{2+j2R\omega C}</math>;  в) <math>\frac{1+jR\omega C}{1+j2R\omega C}</math>; г) <math>\frac{jR\omega C}{1+j2R\omega C}</math></p>
15	<p>Для данной цепи выражение для АЧХ <math> H(j\omega)  = \frac{i_2}{i_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{R}{\sqrt{R^2+\omega L^2}}</math>; б) <math>\frac{2R}{R+j\omega L}</math>;  в) <math>\frac{R}{\sqrt{4R^2+(\omega L)^2}}</math>; г) <math>\frac{2R}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}</math></p>
16	<p>Для данной цепи выражение для ФЧХ <math>\theta(\omega)</math> будет иметь вид</p> $H(j\omega) = \frac{i_2}{i_1} L$ 	<p>а) <math>\arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)</math>; б) <math>-\arctg\left(\frac{\omega L}{2R}\right)</math>;  в) <math>\arctg\left(\frac{\omega L}{2R}\right)</math>; г) <math>\arctg\left(\frac{2\omega L}{R}\right)</math></p>
17	<p>Для данной цепи выражение для АЧХ <math> H(j\omega)  = \frac{u_2}{u_1}</math> будет иметь вид</p> 	<p>а) <math>\frac{R}{\sqrt{R^2+(\omega C)^2}}</math>; б) <math>\frac{R}{\sqrt{R+\omega C}}</math>;  в) <math>\frac{R\omega C}{\sqrt{1+(\omega CR)^2}}</math>; г) <math>\frac{R\omega C}{\sqrt{4+(\omega CR)^2}}</math></p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
18	<p>Для данной цепи график ФЧХ <math>\theta(\omega)</math> будет иметь вид <math>H(j\omega) = \frac{U_2}{U_1}</math></p> 	
19	<p>Для данной цепи график АЧХ <math> H(j\omega)  = \frac{U_2}{U_1}</math> будет иметь вид</p> 	
20	<p>Для данной цепи график АЧХ <math> H(j\omega)  = \frac{U_2}{U_1}</math> будет иметь вид</p> 	

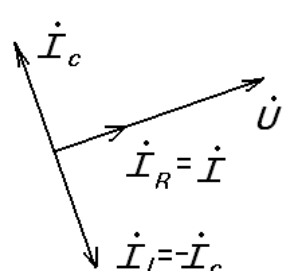
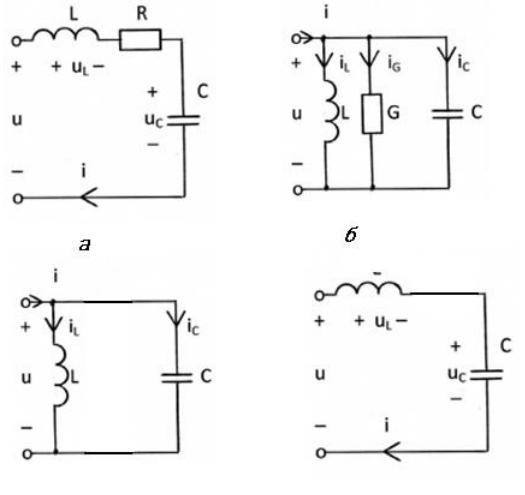
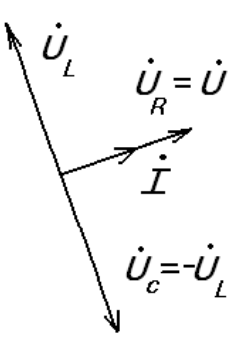
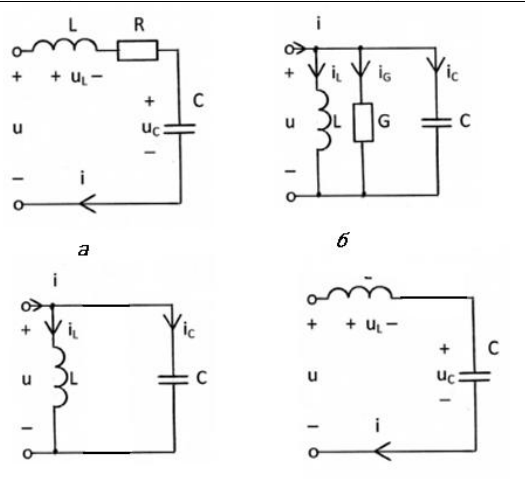
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
21	<p>Для данной цепи график ФЧХ <math>\theta(\omega)</math> будет иметь вид <math>H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}</math></p> 	 <p>а) б) в) г)</p>
22	<p>Для данной цепи выражение для ФЧХ <math>\theta(\omega)</math> будет иметь вид <math>H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}</math></p> 	<p>а) <math>\frac{\pi}{2} + \text{arctg}(R\omega C)</math>; б) <math>\frac{\pi}{2} - \text{arctg}(R\omega C)</math>; в) <math>\frac{\pi}{2} - \text{arctg}(2R\omega C)</math>; г) <math>-\text{arctg}(R\omega C)</math></p>
23	<p>Для данной цепи выражение для ФЧХ <math>\theta(\omega)</math> будет иметь вид <math>H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}</math></p> 	<p>а) <math>-\text{arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right)</math>; б) <math>\frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right)</math>; в) <math>\text{arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right)</math>; г) <math>\text{arctg}\left(\frac{2\omega L}{R}\right)</math></p>
24	<p>Для данной цепи выражение для ФЧХ <math>\theta(\omega)</math> будет иметь вид <math>H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}</math></p> 	<p>а) <math>\frac{\pi}{2} + \text{arctg}(2R\omega C)</math>; б) <math>\frac{\pi}{2} - \text{arctg}(R\omega C)</math>; в) <math>\frac{\pi}{2} - \text{arctg}(2R\omega C)</math>; г) <math>-\text{arctg}(R\omega C)</math></p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
25	Резонансная частота $\omega_0$ последовательного колебательного контура определяется формулой	а) $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ; б) $\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{LC}}$ ; в) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ; г) $\omega_0 = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$
26	Резонансная частота $\omega_0$ параллельного колебательного контура определяется формулой	а) $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ; б) $\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{LC}}$ ; в) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ; г) $\omega_0 = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$
27	Волновое сопротивление последовательного колебательного контура определяется формулой	а) $\rho = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ ; б) $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ; в) $\rho = \sqrt{2\frac{L}{C}}$ ; г) $\rho = \sqrt{\frac{L}{2C}}$
28	Сопротивление последовательного колебательного контура на частоте $\omega = \omega_0$ определяется формулой	а) $R$ ; б) $2R$ ; в) $R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ ; г) $j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$
29	Добротность последовательного колебательного контура определяется формулой	а) $\frac{\omega_0 L}{R}$ ; б) $\frac{1}{\omega_0 CR}$ ; в) $\frac{\omega_0 C}{G}$ ; г) $\frac{1}{\omega_0 LG}$
30	Добротность параллельного колебательного контура определяется формулой	а) $\frac{\omega_0 L}{R}$ ; б) $\frac{1}{\omega_0 CR}$ ; в) $\frac{\omega_0 C}{G}$ ; г) $\frac{1}{\omega_0 LG}$
31	Сопротивление параллельного колебательного контура на частоте $\omega = \omega_0$ определяется формулой	а) $R$ ; б) $2R$ ; в) $R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ ; г) $j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$
32	Волновое сопротивление параллельного колебательного контура определяется формулой	а) $\rho = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ ; б) $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ; в) $\rho = \sqrt{2\frac{L}{C}}$ ; г) $\rho = \sqrt{\frac{L}{2C}}$
33	Комплексная передаточная функция $H(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}}$ последовательного колебательного контура описывается следующим выражением	а) $\frac{1}{\sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$ ; б) $\frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$ ; в) $\frac{1}{G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$ ; г) $\frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$
34	Комплексная передаточная функция $H(j\omega) = \frac{\dot{U}}{i}$ параллельного колебательного контура описывается следующим выражением	а) $\frac{1}{\sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$ ; б) $\frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$ ; в) $\frac{1}{G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$ ; г) $\frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$
35	АЧХ последовательного колебательного контура для $H(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{1}{\sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$ ; б) $\frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$ ; в) $\frac{1}{G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$ ; г) $\frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
36	АЧХ параллельного колебательного контура для $H(j\omega) = \frac{\dot{U}}{i}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{1}{\sqrt{G^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}}$ ; б) $\frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$ ; в) $\frac{1}{G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})}$ ; г) $\frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$
37	Комплексная передаточная функция $H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}}$ последовательного колебательного контура описывается следующим выражением	а) $\frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$ ; в) $\frac{j\frac{\omega}{L}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$
38	Комплексная передаточная функция $H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}}$ последовательного колебательного контура описывается следующим выражением	а) $\frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$ ; в) $\frac{j\frac{\omega}{L}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$
39	Комплексная передаточная функция $H_L(j\omega) = \frac{i_L}{i}$ параллельного колебательного контура описывается следующим выражением	а) $\frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}}$ ; в) $\frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$
40	Комплексная передаточная функция $H_C(j\omega) = \frac{i_C}{i}$ параллельного колебательного контура описывается следующим выражением	а) $\frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}}$ ; в) $\frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega G}{C} + \frac{1}{LC}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$
41	АЧХ последовательного колебательного контура для $H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{\frac{\omega}{L}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; б) $\frac{\omega^2}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$ ; в) $\frac{\omega^2}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$
42	АЧХ параллельного колебательного контура для $H_C(j\omega) = \frac{i_C}{i}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{\frac{\omega}{L}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; б) $\frac{\omega^2}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$ ; в) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$
43	АЧХ параллельного колебательного контура для $H_L(j\omega) = \frac{i_L}{i}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{\frac{\omega}{L}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; б) $\frac{\omega^2}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$ ; в) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
44	АЧХ параллельного колебательного контура для $H_L(j\omega) = \frac{i_L}{i}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{\frac{\omega}{L}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; б) $\frac{\omega^2}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$ ; в) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ ; г) $\frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 G^2}{C^2}}}$
45	ФЧХ последовательного колебательного контура для $H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}}$ описывается следующим выражением	а) $-\arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; в) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; г) $-\arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
46	ФЧХ последовательного колебательного контура для $H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}}$ описывается следующим выражением	а) $-\arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; в) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; г) $-\arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
47	ФЧХ параллельного колебательного контура для $H_C(j\omega) = \frac{i_C}{i}$ описывается следующим выражением	а) $-\arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; в) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; г) $-\arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
48	ФЧХ параллельного колебательного контура для $H_L(j\omega) = \frac{i_L}{i}$ описывается следующим выражением	а) $-\arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; б) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega G}{C}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; в) $\pi - \arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$ ; г) $-\arctg \frac{\frac{\omega R}{L}}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
49	Полоса пропускания параллельного колебательного контура равна	а) $\frac{2\omega_0}{Q}$ ; б) $\frac{\omega_0}{2Q}$ ; в) $\frac{\omega_0}{Q}$ ; г) $\frac{\omega_0}{\rho}$
50	ФЧХ последовательного колебательного контура для $H(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$ ; б) $-\arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$ ; в) $-\arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$ ; г) $\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$
51	ФЧХ параллельного колебательного контура для $H(j\omega) = \frac{\dot{U}}{i}$ описывается следующим выражением	а) $\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$ ; б) $-\arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$ ; в) $-\arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$ ; г) $\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$
52	Чему равна добротность последовательного колебательного контура, если $R = 100 \text{ Ом}$ , $C = 1 \text{ нФ}$ , $L = 1 \text{ мГн}$ ?	а) 1; б) 10; в) 20; г) 0,1
53	Чему равна добротность параллельного колебательного контура, если $R = 100 \text{ Ом}$ , $C = 1 \text{ нФ}$ , $L = 1 \text{ мГн}$ ?	а) 1; б) 10; в) 20; г) 0,1



№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
54	Чему равно сопротивление последовательного колебательного контура на резонансной частоте, если $R = 100 \text{ Ом}$ , $C = 1 \text{ нФ}$ , $L = 1 \text{ мГн}$ ?	а) 100; б) 10; в) 200; г) 150
55	Чему равна полоса пропускания $\omega_1 - \omega_{-1}$ последовательного колебательного контура, если $R = 100 \text{ Ом}$ , $C = 1 \text{ нФ}$ , $L = 1 \text{ мГн}$ ?	а) $10^5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ; б) $10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ; в) $10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ; г) $10^2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
56	Чему равна полоса пропускания $\omega_1 - \omega_{-1}$ параллельного колебательного контура, если $R = 100 \text{ Ом}$ , $C = 1 \text{ нФ}$ , $L = 1 \text{ мГн}$ ?	а) $10^5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ; б) $10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ; в) $10^7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ; г) $10^2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
57	В последовательном колебательном контуре имеет место	а) резонанс токов; б) резонанс напряжений; в) магнитный резонанс; г) акустический резонанс
58	В параллельном колебательном контуре имеет место	а) резонанс токов; б) резонанс напряжений; в) магнитный резонанс; г) акустический резонанс
59	Какой цепи соответствует приведенная векторная диаграмма токов и напряжений? 	
60	Какой цепи соответствует приведенная векторная диаграмма токов и напряжений? 	

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
61	В параллельном колебательном контуре на резонансной частоте	а) происходит взаимная компенсация напряжений на реактивных элементах; б) происходит взаимная компенсация токов на реактивных элементах; в) входное сопротивление контура равно $R$ ; г) входное сопротивление контура равно $Q \cdot R$
62	В последовательном колебательном контуре на резонансной частоте	а) происходит взаимная компенсация напряжений на реактивных элементах; б) происходит взаимная компенсация токов на реактивных элементах; в) входное сопротивление контура равно $R$ ; г) входное сопротивление контура равно $Q \cdot R$
63	Добротностью последовательного контура называется	а) отношение напряжения на любом из реактивных элементов к напряжению на входе контура на резонансной частоте; б) отношение токов в любом из реактивных элементов к току на входе контура на резонансной частоте; в) отношение напряжения на резистивном элементе к току на входе контура на резонансной частоте; г) отношение тока в резистивном элементе к току на входе контура на резонансной частоте
64	Добротностью параллельного контура называется	а) отношение напряжения на любом из реактивных элементов к напряжению на входе контура на резонансной частоте; б) отношение токов в любом из реактивных элементов к току на входе контура на резонансной частоте; в) отношение напряжения на резистивном элементе к току на входе контура на резонансной частоте; г) отношение тока в резистивном элементе к току на входе контура на резонансной частоте
65	Как меняется полоса пропускания последовательного контура при увеличении $R$ ?	а) уменьшается; б) увеличивается; в) остается неизменной
66	Как меняется полоса пропускания параллельного контура при увеличении $R$ ?	а) уменьшается; б) увеличивается; в) остается неизменной
67	Как меняется полоса пропускания параллельного контура при уменьшении $R$ ?	а) уменьшается; б) увеличивается; в) остается неизменной

## Контрольные вопросы

1. Что называется комплексной передаточной функцией цепи?
2. Запишите виды комплексных передаточных функций с указанием их размерности.
3. Запишите комплексную передаточную функцию в показательной форме.
4. Что называется амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками цепи? Как они связаны с комплексной передаточной функцией?
5. Что называется полосой пропускания цепи?
6. Какое явление в цепи называют резонансом?
7. Каковы условия резонанса в последовательном и параллельном колебательных контурах?
8. Что такое характеристическое сопротивление контура, резонансная частота, добротность? Как определяется добротность последовательного и параллельного контуров?
9. Почему резонанс в последовательном контуре называют резонансом напряжений? Какими будут напряжения при резонансе на каждом из элементов контура по сравнению с приложенным ко входу контура напряжением?
10. Чему равно входное сопротивление последовательного контура при резонансе? Чему равен сдвиг по фазе между током и напряжением на входных зажимах контура при резонансе?
11. Почему резонанс в параллельном контуре называют резонансом тока? Какими будут токи при резонансе в каждом из элементов контура по сравнению с током источника?
12. Чему равно входное сопротивление параллельного контура при резонансе?
13. Что называют полосой пропускания резонансного контура?

## 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Четырехполюсники и их классификация. Уравнения передачи, параметры и матрицы параметров четырехполюсников. Соединения четырехполюсников.

### 5.1. Четырехполюсники и их классификация

Четырехполюсником называют электрическую цепь любой сложности, имеющую две пары внешних зажимов. Подобные ЭЦ предназначены для передачи электрических сигналов от генератора к нагрузке и включены таким образом, что через входные и выходные зажимы проходят попарно равные токи, положительные направления которых показаны на рис. 5.1.

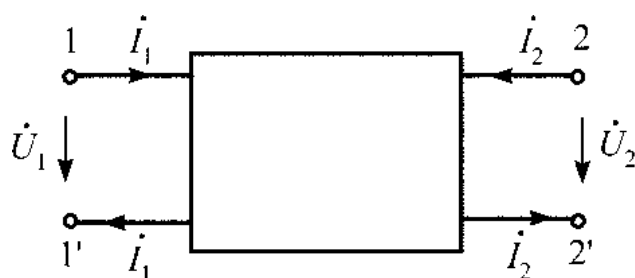


Рис. 5.1

Четырехполюсники подразделяются:

- на *линейные и нелинейные*. У линейного четырехполюсника напряжение и ток на выходных зажимах линейно зависят от напряжения и тока на входных зажимах, у нелинейных четырехполюсников эта зависимость соответственно нелинейная. Нелинейные четырехполюсники содержат хотя бы один нелинейный элемент;

- *активные и пассивные*. Активные четырехполюсники содержат источники энергии. Пассивные – состоят из пассивных элементов;

- *обратимые и необратимые*. Обратимые четырехполюсники удовлетворяют принципу взаимности, т. е. передают одинаково энергию в обоих направлениях. Необратимые – принципу взаимности не удовлетворяют;

- *симметричные и несимметричные*. Для того чтобы четырехполюсник был симметричным, его схема должна обладать симметрией относительно вертикальной оси  $n-n'$  (рис. 5.2). Пример такого четырехполюсника приведен на рис. 5.3. Несимметричные четырехполюсники не обладают симметрией относительно вертикальной оси;

- *уравновешенные и неуравновешенные*. Для того чтобы четырехполюсник был уравновешенным, его схема должна обладать симметрией относительно горизонтальной оси  $m-m'$  (рис. 5.2). Пример такого четырехполюсника приведен на рис. 5.4. Неуравновешенные четырехполюсники не обладают симметрией относительно горизонтальной оси  $m-m'$ .

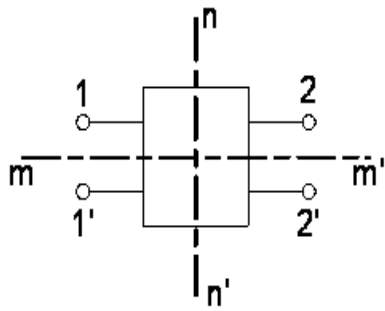


Рис. 5.2

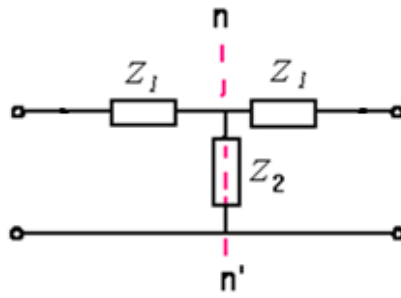


Рис. 5.3

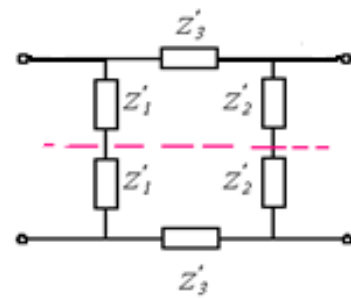


Рис. 5.4

## 5.2. Уравнения передачи, параметры и матрицы параметров четырехполюсников

Соотношения, связывающие комплексные напряжения и токи на двух парах зажимов четырехполюсника, называют уравнениями передачи четырехполюсника.

Коэффициенты уравнений передачи четырехполюсника называют собственными или внутренними параметрами, так как они определяются только его схемой и значениями элементов и не зависят от внешних цепей, между которыми включен четырехполюсник.

Различают пять форм записи уравнений передачи четырехполюсника и собственно пять видов его параметров. Такой подход определяется пятью видами соединений четырехполюсников (последовательное, параллельное, каскадное, последовательно-параллельное и параллельно-последовательное).

Уравнения передачи четырехполюсника, положительные направления токов и напряжений которого показаны на рис. 5.1, в обычной и матричной формах записи имеют вид:

- через  $Z$ -параметры (параметры сопротивлений, холостого хода):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2; \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix};$$

- через  $Y$ -параметры (параметры проводимостей, короткого замыкания):

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2; \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix};$$

- через  $A$ -параметры (обобщенные или каскадные параметры), которые применяются при каскадном соединении четырехполюсников, когда выходные зажимы первого четырехполюсника соединяются с входными зажимами второго:

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

- через  $H$ -параметры, которые применяются при рассмотрении схем с биполярными транзисторами:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2; \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix};$$

- через  $F$ -параметры:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = F_{11}\dot{U}_1 + F_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = F_{21}\dot{U}_1 + F_{22}\dot{I}_2; \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}.$$

## Примеры расчета параметров четырехполюсников

### 1. Пример расчета $Z$ -параметров

Найдем  $Z$ -параметры четырехполюсника, представленного на рис. 5.5.

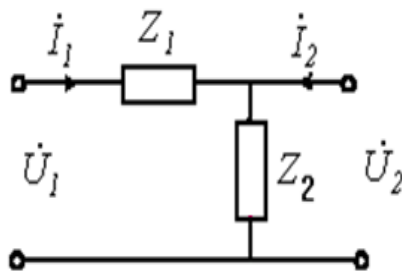
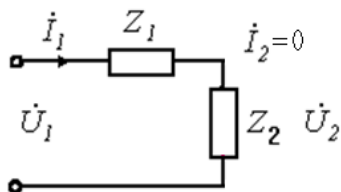


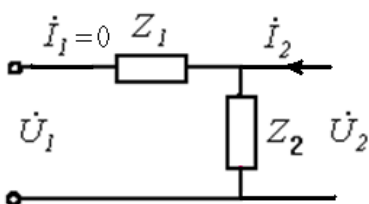
Рис. 5.5

Решение



$$Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} = Z_1 + Z_2$$

$$Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} = Z_2$$



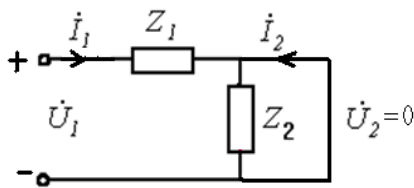
$$Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} = Z_2$$

$$Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} = Z_2$$

## 2. Пример расчета Y-параметров

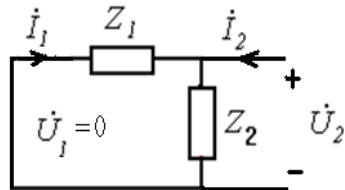
Найдем Y-параметры четырехполюсника, представленного на рис. 5.5.

Решение



$$Y_{11} = \left. \frac{i_1}{U_1} \right|_{U_2=0} = \frac{1}{Z_1}$$

$$Y_{21} = \left. \frac{i_2}{U_1} \right|_{U_2=0} = -\frac{1}{Z_1}$$



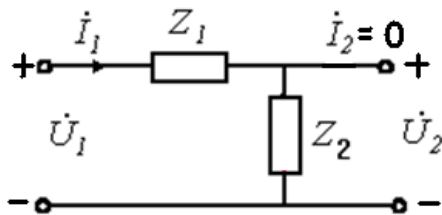
$$Y_{12} = \left. \frac{i_1}{U_2} \right|_{U_1=0} = -\frac{1}{Z_1}$$

$$Y_{22} = \left. \frac{i_2}{U_2} \right|_{U_1=0} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

## 3. Пример расчета A-параметров

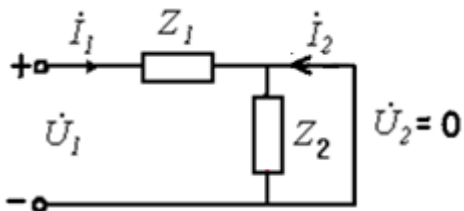
Найдем A-параметры четырехполюсника, представленного на рис. 5.5.

Решение



$$A_{11} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{i_2=0} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$$

$$A_{21} = \left. \frac{i_1}{U_2} \right|_{i_2=0} = \frac{1}{Z_2}$$



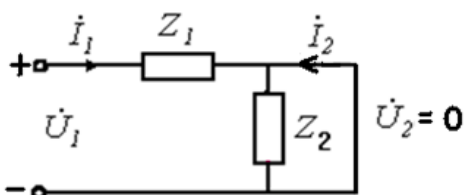
$$A_{12} = \left. \frac{U_1}{-i_2} \right|_{U_2=0} = Z_1$$

$$A_{22} = \left. \frac{i_1}{-i_2} \right|_{U_2=0} = 1$$

## 4. Пример расчета H-параметров

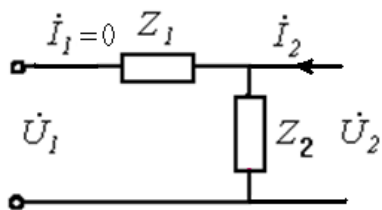
Найдем H-параметры четырехполюсника, представленного на рис. 5.5.

Решение



$$H_{11} = \left. \frac{U_1}{i_1} \right|_{U_2=0} = Z_1$$

$$H_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{U_2=0} = -1$$



$$H_{12} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \Big|_{i_1=0} = 1$$

$$H_{22} = \frac{\dot{i}_2}{\dot{U}_2} \Big|_{i_1=0} = \frac{1}{Z_2}$$

### 5.3. Соединения четырехполюсников

Схемы соединения четырехполюсников и формулы нахождения параметров составного четырехполюсника по известным параметрам составляющих его четырехполюсников представлены в табл. 5.1 ( $N$  – число четырехполюсников в соединении).

Таблица 5.1

№ п/п	Схема соединения четырехполюсника	Формулы расчета
1	Последовательное 	$(Z) = \sum_{k=1}^N (Z_k)$ $N = 2 \quad (Z) = (Z_1) + (Z_2)$
2	Параллельное 	$(Y) = \sum_{k=1}^N (Y_k)$ $N = 2 \quad (Y) = (Y_1) + (Y_2)$
3	Каскадное 	$(A) = \prod_{k=1}^N (A_k)$ $N = 2 \quad (A) = (A_1) \cdot (A_2)$
4	Последовательно-параллельное 	$(H) = \sum_{k=1}^N (H_k)$ $N = 2 \quad (H) = (H_1) + (H_2)$
5	Параллельно-последовательное 	$(F) = \sum_{k=1}^N (F_k)$ $N = 2 \quad (F) = (F_1) + (F_2)$

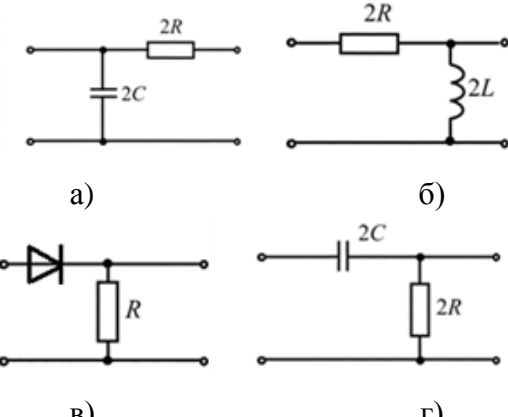
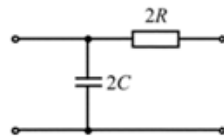
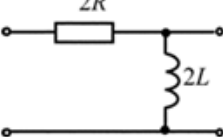
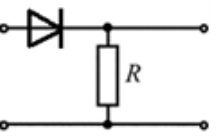
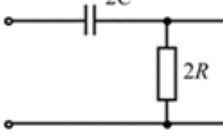
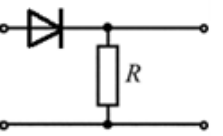
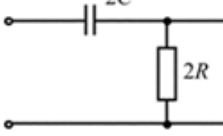
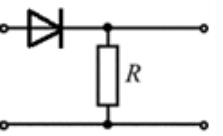
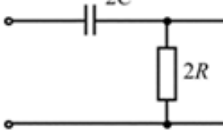
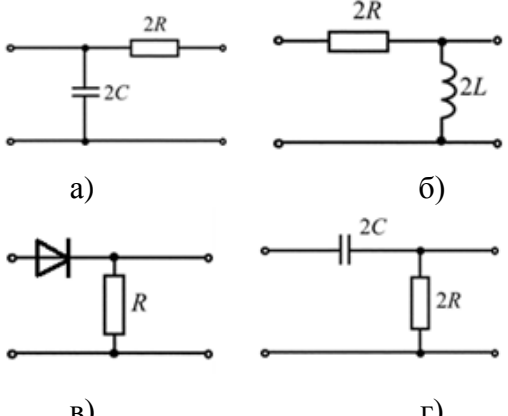
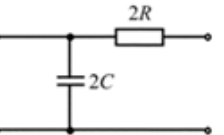
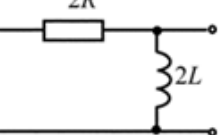
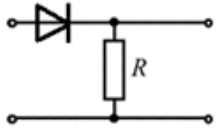
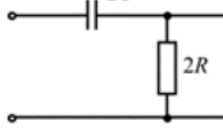
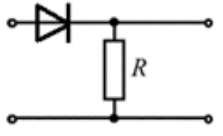
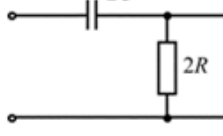
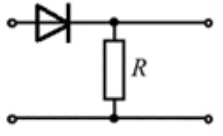
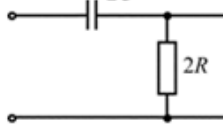
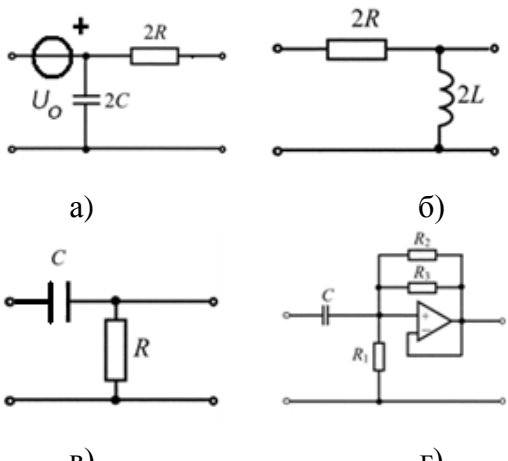
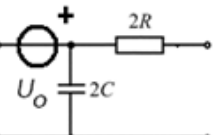
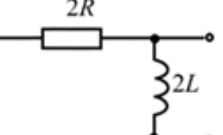
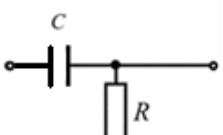
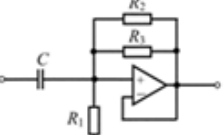
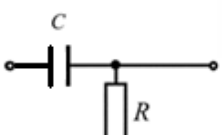
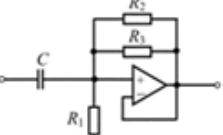
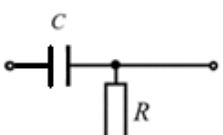
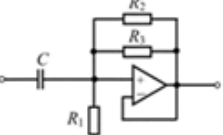


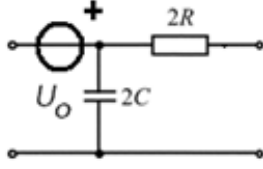
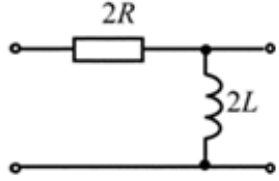
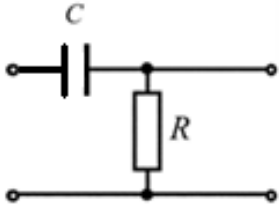
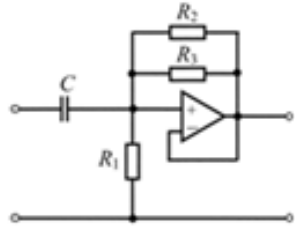
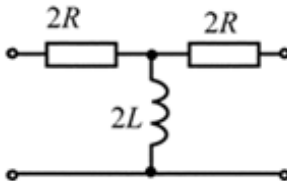
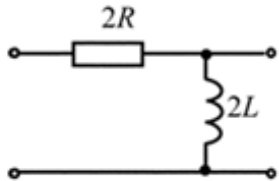
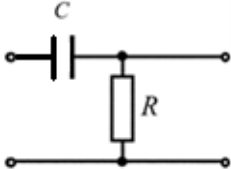
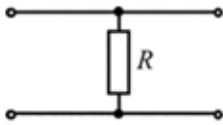
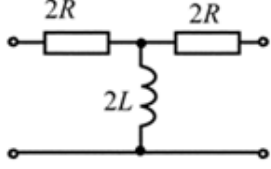
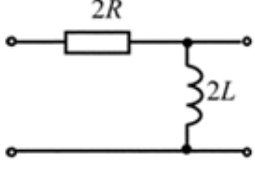
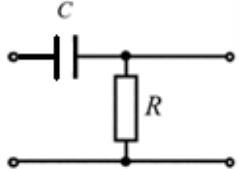
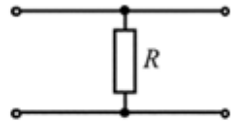
Приведенные в табл. 5.1 формулы справедливы только для регулярного соединения четырехполюсников, т. е. когда после соединения система уравнений каждого из четырехполюсников остается такой же, какой она была до соединения.

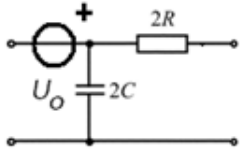
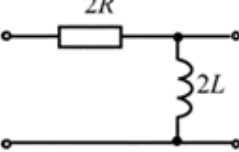
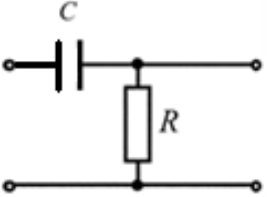
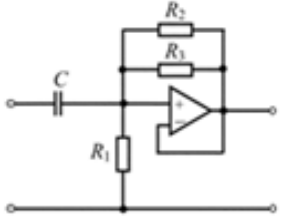
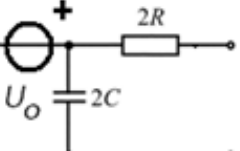
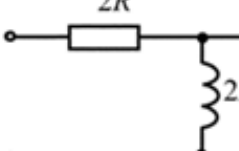
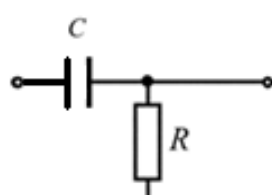
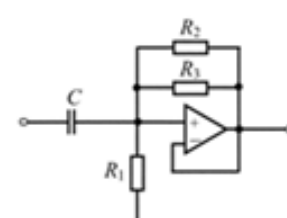
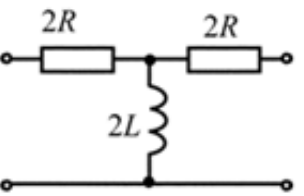
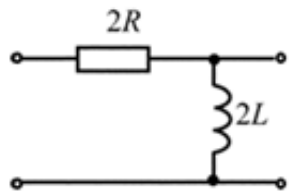
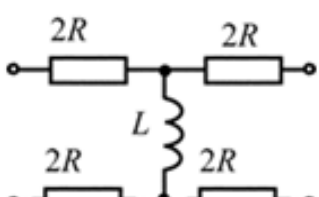
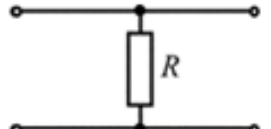
### Тесты

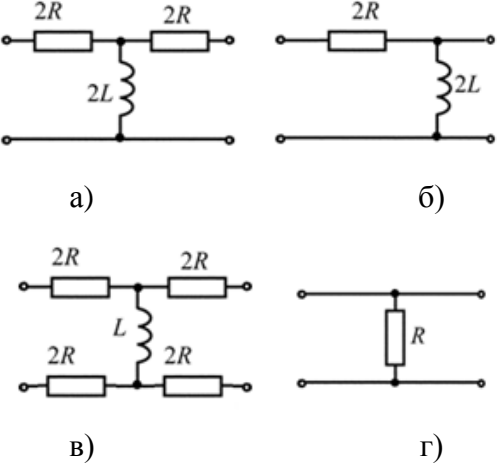
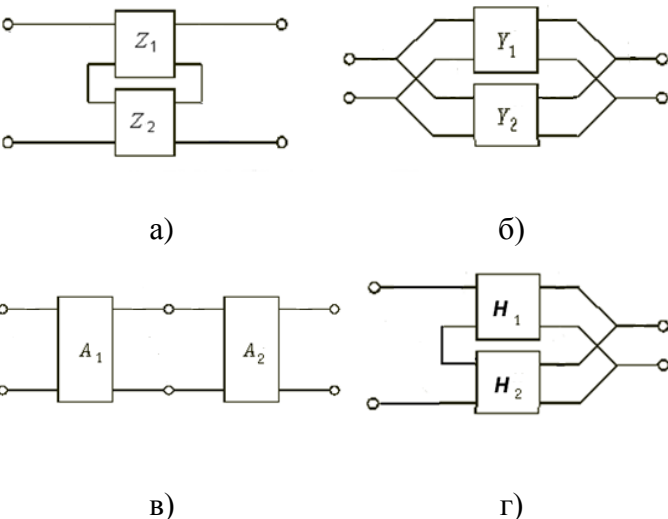
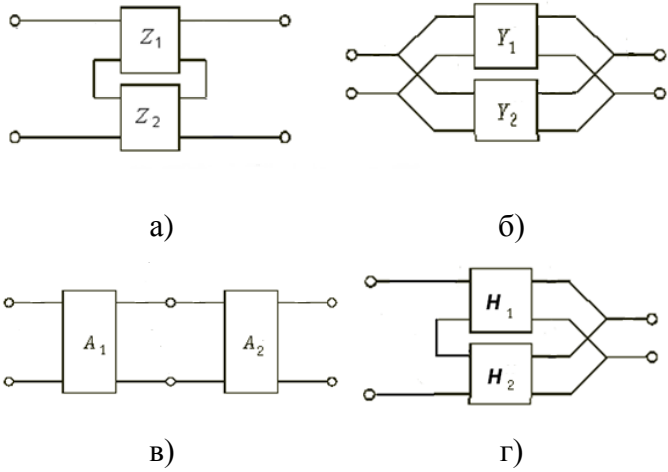
После разбора решения типовых задач предлагается выполнить тесты (табл. 5.2).

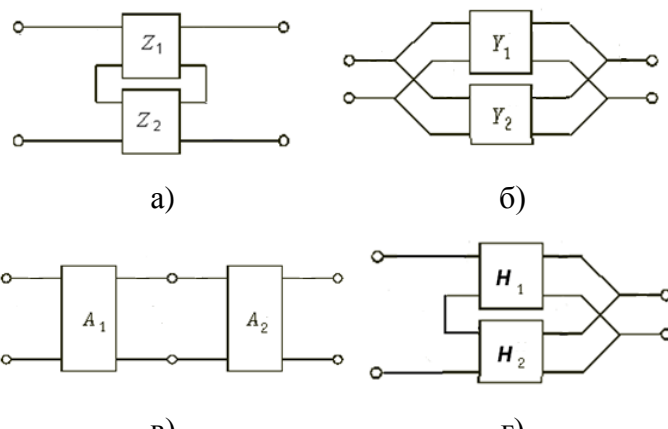
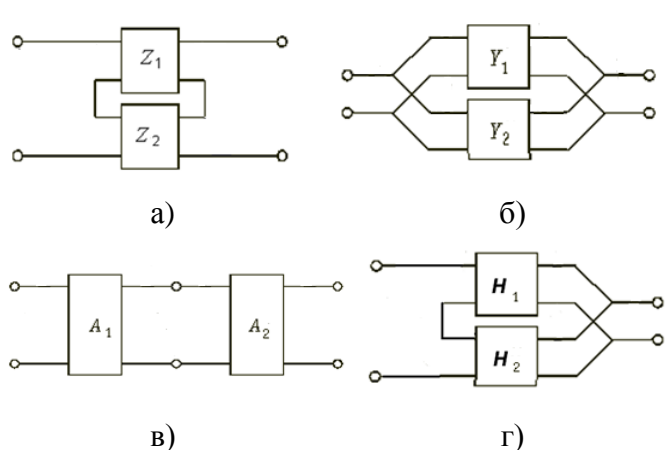
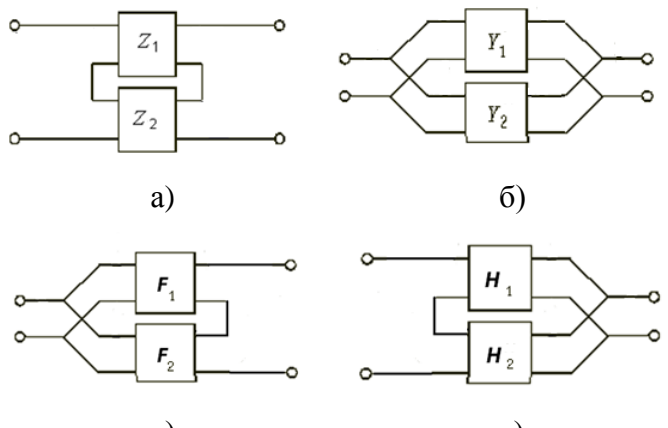
Таблица 5.2

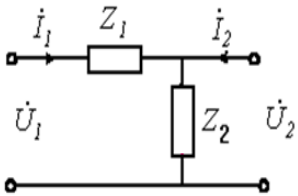
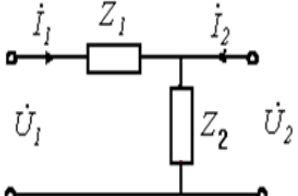
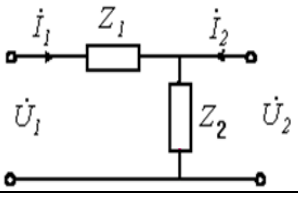
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
1	Какой из приведенных четырехполюсников является линейным?	 <p>а)  </p> <p>б)  </p> <p>в)  </p> <p>г)  </p>
2	Какой из приведенных четырехполюсников является нелинейным?	 <p>а)  </p> <p>б)  </p> <p>в)  </p> <p>г)  </p>
3	Какой из приведенных четырехполюсников является пассивным?	 <p>а)  </p> <p>б)  </p> <p>в)  </p> <p>г)  </p>

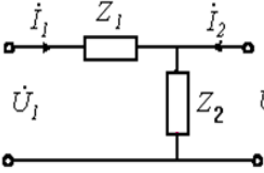
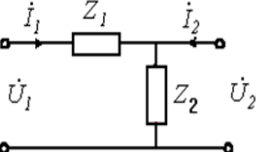
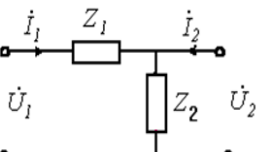
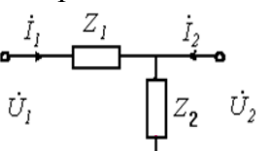
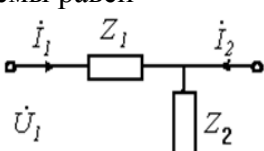
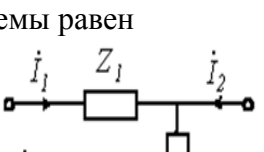
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
4	Какой из приведенных четырехполюсников является активным?	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>а)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>б)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>в)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>г)</p> </div> </div>
5	Какой из приведенных четырехполюсников является симметричным?	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>а)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>б)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>в)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>г)</p> </div> </div>
6	Какой из приведенных четырехполюсников является несимметричным?	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>а)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>б)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>в)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>г)</p> </div> </div>

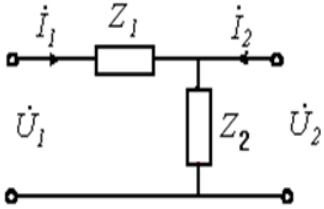
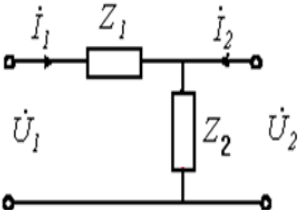
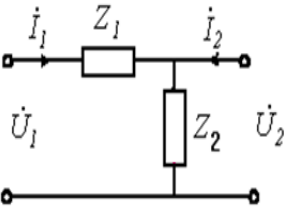
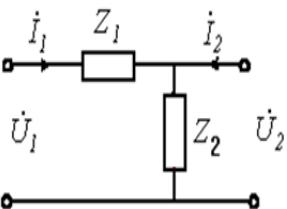
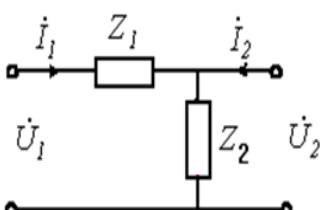
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
7	Какой из приведенных четырехполюсников является обратимым?	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>а)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>б)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>в)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>г)</p> </div> </div>
8	Какой из приведенных четырехполюсников является необратимым?	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>а)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>б)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>в)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>г)</p> </div> </div>
9	Какой из приведенных четырехполюсников является уравновешенным?	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>а)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>б)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>в)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>г)</p> </div> </div>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
10	Какой из приведенных четырехполюсников является неуравновешенным?	 <p>а)                      б)</p> <p>в)                      г)</p>
11	Схема последовательного соединения четырехполюсников представлена на рисунке	 <p>а)                      б)</p> <p>в)                      г)</p>
12	Схема параллельного соединения четырехполюсников представлена на рисунке	 <p>а)                      б)</p> <p>в)                      г)</p>

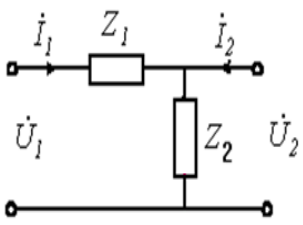
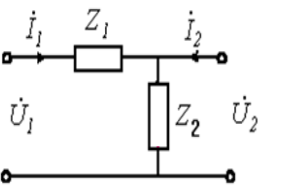
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
13	<p>Схема каскадного соединения четырехполюсников представлена на рисунке</p>	 <p>а) б) в) г)</p>
14	<p>Схема последовательно-параллельного соединения четырехполюсников представлена на рисунке</p>	 <p>а) б) в) г)</p>
15	<p>Схема параллельно-последовательного соединения четырехполюсников представлена на рисунке</p>	 <p>а) б) в) г)</p>
16	<p>Пропущенная матрица в выражении</p> $\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ? \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix}$	<p>а) <math>\begin{pmatrix} F_{11} &amp; F_{12} \\ F_{21} &amp; F_{22} \end{pmatrix}</math>; б) <math>\begin{pmatrix} H_{11} &amp; H_{12} \\ H_{21} &amp; H_{22} \end{pmatrix}</math>;</p> <p>в) <math>\begin{pmatrix} A_{11} &amp; A_{12} \\ A_{21} &amp; A_{22} \end{pmatrix}</math>; г) <math>\begin{pmatrix} Y_{11} &amp; Y_{12} \\ Y_{21} &amp; Y_{22} \end{pmatrix}</math></p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
17	Пропущенная матрица в выражении $\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ? \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{pmatrix}$	а) $\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}$ ;    б) $\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$ ; в) $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ ;    г) $\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$
18	Пропущенная матрица в выражении $\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ? \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}$	а) $\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}$ ;    б) $\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$ ; в) $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ ;    г) $\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$
19	Пропущенная матрица в выражении $\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ? \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix}$	а) $\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}$ ;    б) $\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$ ; в) $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ ;    г) $\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$
20	Пропущенная матрица в выражении $\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ? \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}$	а) $\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}$ ;    б) $\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$ ; в) $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ ;    г) $\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$
21	Параметр $Z_{11}$ для данной схемы равен 	а) $Z_1$ ;                      б) $Z_2$ ; в) $Z_1 + Z_2$ ;            г) 1
22	Параметр $Z_{12}$ для данной схемы равен 	а) $Z_1$ ;                      б) $Z_2$ ; в) $Z_1 + Z_2$ ;            г) 1
23	Параметр $Z_{21}$ для данной схемы равен 	а) $Z_1$ ;                      б) $Z_2$ ; в) $Z_1 + Z_2$ ;            г) 1

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
24	Параметр $Z_{22}$ для данной схемы равен 	а) $Z_1$ ;            б) $Z_2$ ; в) $Z_1 + Z_2$ ;    г) 1
25	Параметр $Y_{11}$ для данной схемы равен 	а) $\frac{1}{Z_1}$ ;            б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$ ;    г) $-\frac{1}{Z_1}$
26	Параметр $Y_{12}$ для данной схемы равен 	а) $\frac{1}{Z_1}$ ;            б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$ ;    г) $-\frac{1}{Z_1}$
27	Параметр $Y_{22}$ для данной схемы равен 	а) $\frac{1}{Z_1}$ ;            б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$ ;    г) $-\frac{1}{Z_1}$
28	Параметр $Y_{21}$ для данной схемы равен 	а) $\frac{1}{Z_1}$ ;            б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$ ;    г) $-\frac{1}{Z_1}$
29	Параметр $A_{11}$ для данной схемы равен 	а) 1;                    б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{Z_1+Z_2}{Z_2}$ ;        г) $Z_1$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
30	Параметр $A_{22}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{Z_1+Z_2}{Z_2}$ ;        г) $Z_1$
31	Параметр $A_{12}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{Z_1+Z_2}{Z_2}$ ;        г) $Z_1$
32	Параметр $A_{21}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $\frac{Z_1+Z_2}{Z_2}$ ;        г) $Z_1$
33	Параметр $H_{11}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $Z_1$ ;                      г) $-1$
34	Параметр $H_{12}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $Z_1$ ;                      г) $-1$



№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
35	Параметр $H_{21}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $Z_1$ ;                    г) $-1$
36	Параметр $H_{22}$ для данной схемы равен 	а) 1;                      б) $\frac{1}{Z_2}$ ; в) $Z_1$ ;                    г) $-1$

### Контрольные вопросы

1. Какая электрическая цепь называется четырехполюсником?
2. Какие виды четырехполюсников вам известны?
3. Что называется уравнениями передачи четырехполюсника, и какие формы этих уравнений возможны?
4. Какие параметры четырехполюсника называют собственными или внутренними?
5. Какие виды собственных параметров четырехполюсника известны?
6. Какие виды соединений четырехполюсников различают?
7. Как определить  $Z$ -параметры последовательного соединения четырехполюсников?
8. Как определить  $Y$ -параметры параллельного соединения четырехполюсников?
9. Как определить  $A$ -параметры каскадного соединения четырехполюсников?
10. Как определить  $F$ -параметры параллельно-последовательного соединения четырехполюсников?
11. Как определить  $H$ -параметры последовательно-параллельного соединения четырехполюсников?

## Список литературы

1. *Белецкий, А. Ф.* Теория линейных электрических цепей : учебник / А. Ф. Белецкий. – 2-е изд. – СПб. : Лань, 2009. – 544 с.

2. *Бакалов, В. П.* Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. Н. Крук. – 3-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с.

3. *Белецкий, А. Ф.* Анализ нелинейных резистивных цепей / А. Ф. Белецкий, В. Ф. Дмитриков, Ю. И. Лыпарь ; ЛЭИС. – Л., 1990.

4. *Белецкий, А. Ф.* Нелинейные преобразования колебаний и цепи с обратной связью : учеб. пособие для спец. 2305, 2306, 2307 / А. Ф. Белецкий, В. Ф. Дмитриков ; ЛЭИС. – Л., 1991.

**Зайцева Зинаида Викторовна  
Логвинова Нина Константиновна  
Сергеев Валерий Варламович  
Шушпанов Дмитрий Викторович**

## **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

### **Часть 1**

## **КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **Разделы 4 и 5**

### **Учебное пособие**

Ответственный редактор *З. В. Зайцева*

Редактор *И. И. Щенсяк*

План издания 2018 г., п. 134в

Подписано к печати 14.02.2018  
Объем 2,75 усл.-печ. л. Тираж 32 экз. Заказ 850

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ  
193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в СПбГУТ

