



**Министерство образования и науки,
молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет
Факультет радиоэлектроники
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Лабораторный практикум
по дисциплине
«Основы теории цепей»**

**для студентов дневной и заочной форм обучения
направления 6.050901 — «Радиотехника»**

Часть 2

**Севастополь
2012**

Методические указания «Лабораторный практикум по дисциплине «Основы теории цепей» для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / СевНТУ; Сост. В.Б. Салицкий, Ю.Я. Смаилов. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. Ч.2— 76 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Основы теории цепей».

Методические указания написаны на основании программы дисциплины «Основы теории цепей» ОПП подготовки бакалавров направления 0509 «Радиотехника, радиоэлектронные аппараты и связь» (Киев, 2009). Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № 5 от 9 декабря 2011 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций,
кандидат технических наук, доцент Михайлюк Ю.П.

Ответственный за выпуск:
 заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций,
доктор технических наук, профессор Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа №8	
Исследование фильтров нижних частот типа « k »	5
2. Лабораторная работа №9	
Исследование фильтров верхних частот типа « k »	17
3. Лабораторная работа №10	
Исследование фильтров верхних и нижних частот типа « m »	22
4. Лабораторная работа №11	
Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях первого порядка	34
5. Лабораторная работа №12	
Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях второго порядка	52
6. Лабораторная работа №13	
Исследование распределения напряжения в длинной линии	61
Библиографический список	74

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы теории цепей» изучается студентами направления 6.050901 «Радиотехника» дневной и заочной форм обучения во 2-ом и 3-ем семестрах. В данную методическую разработку, которая является продолжением методических указаний [1], включены шесть лабораторных работ, выполняемых во второй части дисциплины (третий семестр).

Методические рекомендации по выполнению каждой лабораторной работы содержат следующие разделы: цель работы, теоретические сведения, предварительный расчет, описание лабораторной установки и макета, порядок выполнения работы, обработку результатов измерений, оформление отчета, выводы по работе и контрольные вопросы.

В основу лабораторного практикума положен фронтальный метод проведения работ, заключающийся в том, что группа студентов разделена на бригады, каждая из которых выполняет одну и ту же лабораторную работу на различных лабораторных установках. Бригада состоит, как правило, из двух-трех студентов. В процессе выполнения работы студенты должны вести подробный протокол, в котором излагают ход работы и фиксируют результаты экспериментов. После завершения работы преподаватель просматривает полученные данные и подписывает протокол. На основании протокола каждый студент оформляет отчет, который должен иметь титульный лист и содержать следующие разделы: цель работы, схему лабораторного макета, экспериментальные данные (таблицы с результатами измерений, осциллограммы и др.), результаты обработки экспериментальных данных (графики, диаграммы, измеренные и рассчитанные параметры и др.) и выводы по работе. Отчеты по лабораторным работам следует оформлять в соответствии с [6].

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ ТИПА « k »

1.1. Цель работы

Исследования амплитудно-частотных характеристик реактивных фильтров нижних частот типа « k ».

1.2. Теоретические сведения

Электрическим фильтром называется устройство, предназначенное для выделения колебаний в определенной полосе частот. Эта полоса частот носит название полосы пропускания (ПП) или полосы прозрачности. Полоса частот, в пределах которой колебания, подаваемые на вход фильтра, не проходят на выход фильтра, носит название полосы затухания (ПЗ) или полосы непрозрачности фильтра. Частота, находящаяся на границе полосы пропускания и полосы затухания, называется граничной частотой $\omega_{\text{гр}}$ или частотой среза фильтра.

В зависимости от применяемых элементов, фильтры делятся на реактивные (LC -фильтры), безындуктивные (RC -фильтры), пьезокерамические или кварцевые, магнито-стрикционные и др. В этой лабораторной работе исследуются LC -фильтры, не содержащие усилительных элементов, — пассивные реактивные фильтры.

Электрический фильтр можно представить в виде четырёхполюсника (рис. 1.1). Если на входные зажимы этого устройства подается гармоническое напряжение $u_1(t)$ определенной частоты и амплитуды, то на выходных зажимах появится тоже гармоническое напряжение $u_2(t)$.



Рис. 1.1 — Фильтр-четырёхполюсник

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) четырёхполюсника называют как зависимость коэффициента передачи по напряжению $K(\omega)$, и так и зависимость коэффициента затухания $a(\omega)$ от частоты.

Коэффициент передачи по напряжению $K(\omega)$ величина безразмерная

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}, \quad (1.1)$$

где $U_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}$ — действующие значения напряжений на входных и выходных зажимах соответственно.

На практике, особенно в тех случаях, когда диапазон изменения АЧХ велик, коэффициент передачи часто выражают в децибелах (дБ).

$$K_{\text{дБ}}(\omega) = 20 \lg K(\omega) = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right), \text{ дБ.} \quad (1.2)$$

Коэффициент затухания согласованно включенного четырехполюсника $a(\omega)$ равен натуральному логарифму отношения действующих значений напряжений на входе и выходе. В этом случае затухание измеряется в неперах

$$a(\omega) = \ln \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \right), \text{ Нп.}$$

Отсюда вытекает связь коэффициента передачи и коэффициента затухания четырехполюсника:

$$a(\omega) = \ln \left(\frac{1}{K(\omega)} \right); \quad K(\omega) = e^{-a(\omega)}.$$

На практике для измерения коэффициента затухания часто используются децибелы:

$$a_{\text{дБ}}(\omega) = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \right).$$

Коэффициент передачи $K_{\text{дБ}}(\omega)$ и коэффициент затухания $a_{\text{дБ}}(\omega)$ отличаются только знаком:

$$K_{\text{дБ}}(\omega) = -a_{\text{дБ}}(\omega).$$

Соотношение между неперами и децибелами:

$$1 \text{ Нп} = 8,7 \text{ дБ}; \quad 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп.}$$

В зависимости от расположения полосы пропускания фильтра на частотной шкале различают фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающие (ППФ) и полосно-заграждающие (ПЗФ) или режекторные фильтры.

Фильтр нижних частот — четырехполюсник, полоса пропускания которого находится в диапазоне частот от $\omega = 0$ до некоторой граничной частоты $\omega_{\text{гр}}$, а полоса затухания — в диапазоне частот от $\omega = \omega_{\text{гр}}$ до $\omega \rightarrow \infty$. Амплитудно-частотные характеристики идеального ФНЧ показаны на рис. 1.2.

Как видно из рис. 1.2 для низких частот (от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_{\text{гр}}$) идеальный ФНЧ совершенно прозрачен ($K = 1$; $a = 0$, то есть выходное напряжение равно входному). Колебания с частотами, большими $\omega_{\text{гр}}$, идеальный фильтр не пропускает ($K = 0$; $a = \infty$). Реальный фильтр не может обладать такими характеристиками; их следует рассматривать как предел, к которому можно лишь в той или иной мере приближаться.

Чаще всего для построения реактивных фильтров используют Г-, Т-, и П-

образные звенья (рис. 1.3). При этом Т- и П-образные звенья получают путем каскадного соединения Г-образных звеньев.

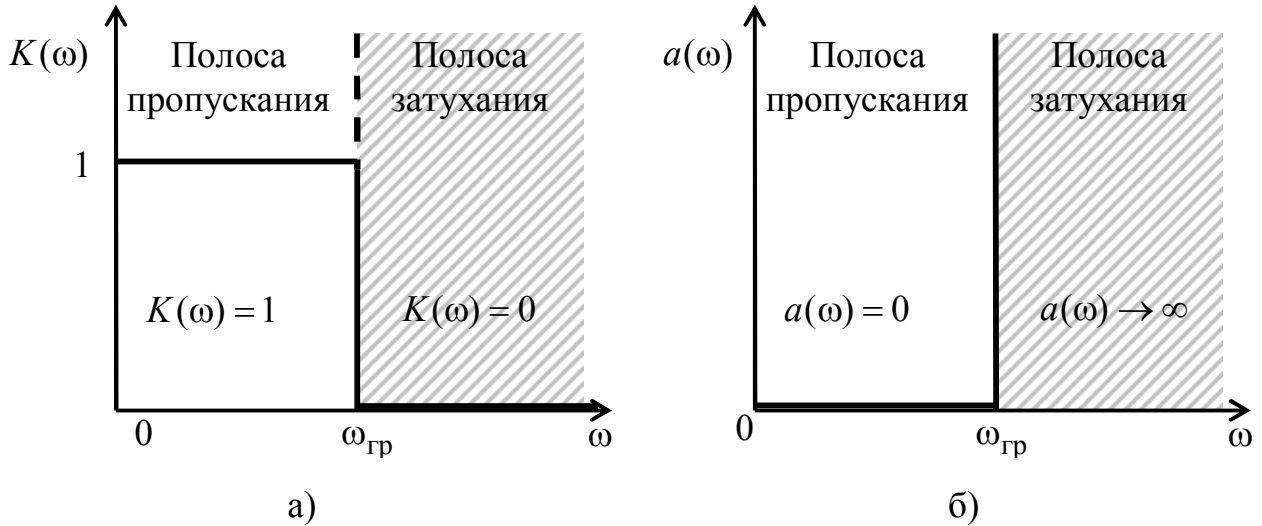


Рис. 1.2 — Зависимости коэффициента передачи по напряжению (а) и затухания (б) идеального ФНЧ от частоты

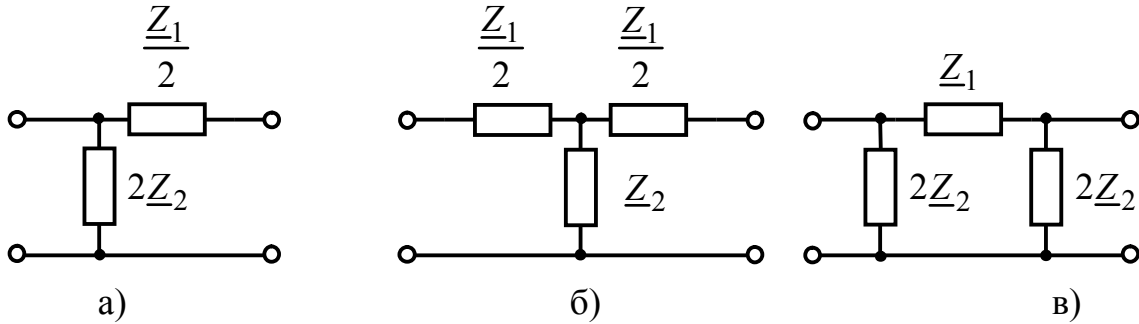


Рис. 1.3 — Комплексные схемы замещения Г-образного (а), Т-образного (б), П-образного (в) звеньев фильтров-четырёхполюсников

Обозначение сопротивлений Г-образного звена выбрано таким образом, что при соединении двух таких звеньев со стороны продольных ветвей получилось бы П-образное звено с продольной ветвью $\underline{Z}_1$ (рис. 1.4в), а при соединении двух Г-образных звеньев со стороны поперечных ветвей получилось бы Т-образное звено с поперечной ветвью $\underline{Z}_2$ (рис. 1.4а).

Фильтрами типа « k » называют LC -фильтры, для которых произведение комплексных сопротивлений продольной и поперечной ветвей равно постоянной вещественной величине k^2 , независимой от частоты, то есть

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 = k^2. \quad (1.3)$$

Условием наличия полосы прозрачности является неравенство [2, 3]:

$$-1 \leq \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2} \leq 0, \quad (1.4)$$

из которого следует вывод, что в продольной и поперечной ветвях фильтра должны находиться реактивные сопротивления противоположных знаков.

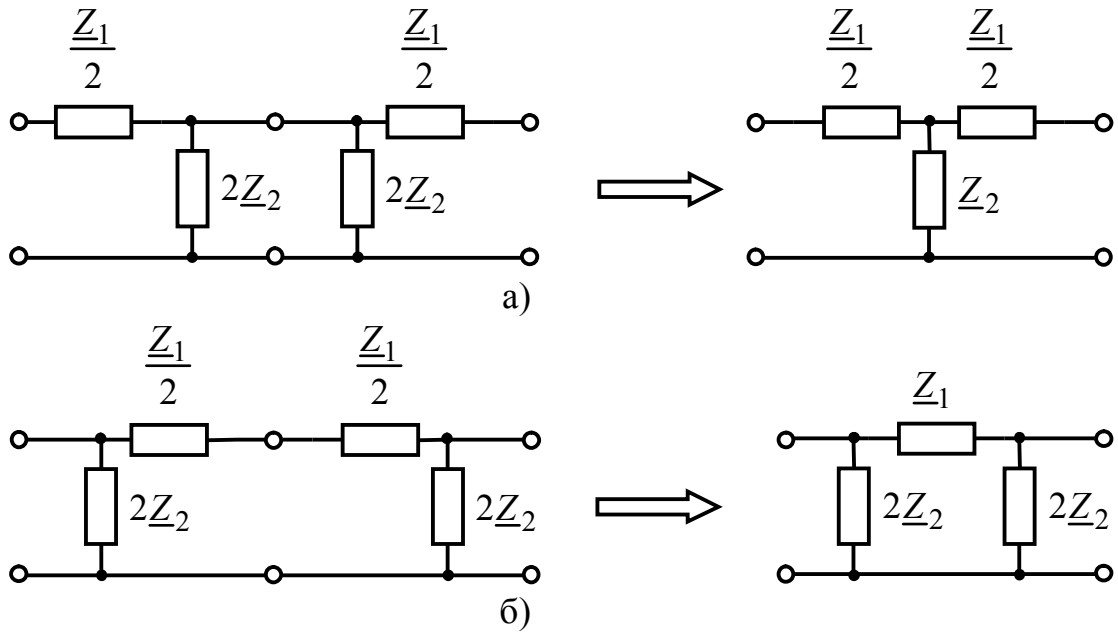


Рис. 1.4 — Реализация Т-образного (а) и П-образного (б) звеньев путем каскадного соединения Г-образных звеньев

Для реализации реактивного ФНЧ типа « k » включают в продольные ветви фильтра индуктивности, а в поперечные — емкости (рис. 1.5).

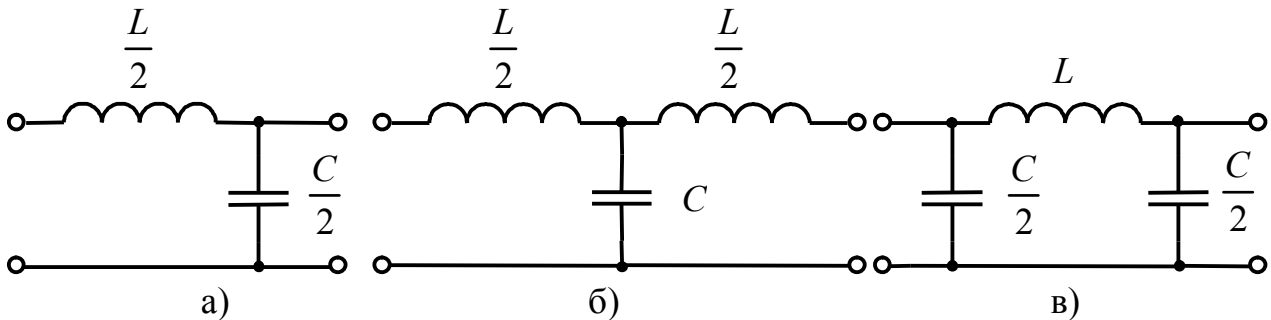


Рис. 1.5 — Схемы фильтров нижних частот типа « k »:
(а) Г-образное звено; (б) Т-образное звено; (в) П-образное звено

При этом комплексные сопротивления $\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ определяются в виде:

$$\underline{Z}_1 = j\omega L; \quad \underline{Z}_2 = -j\frac{1}{\omega C}, \quad (1.5)$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Проведем качественный анализ Г-образного звена ФНЧ типа « k » (рис. 1.5а) в области низких и высоких частот. Последовательное соединение продольной индуктивности и поперечной емкости образует частотно-зависимый делитель напряжения (рис. 1.6). Рассмотрим область низких частот. При стремлении частоты к нулю ($\omega \rightarrow 0$) $|\underline{Z}_1| \rightarrow 0$, а $|\underline{Z}_2| \rightarrow \infty$. При этом коэффициент передачи фильтра $K(\omega) \rightarrow 1$, а затухание — $a(\omega) \rightarrow 0$ (рис. 1.6а). Теперь рассмотрим область высоких частот. При стремлении частоты к бесконечности ($\omega \rightarrow \infty$) $|\underline{Z}_1| \rightarrow \infty$, а $|\underline{Z}_2| \rightarrow 0$. При этом коэффициент передачи

фильтра $K(\omega) \rightarrow 0$, а затухание — $a(\omega) \rightarrow \infty$ (рис. 1.6б).

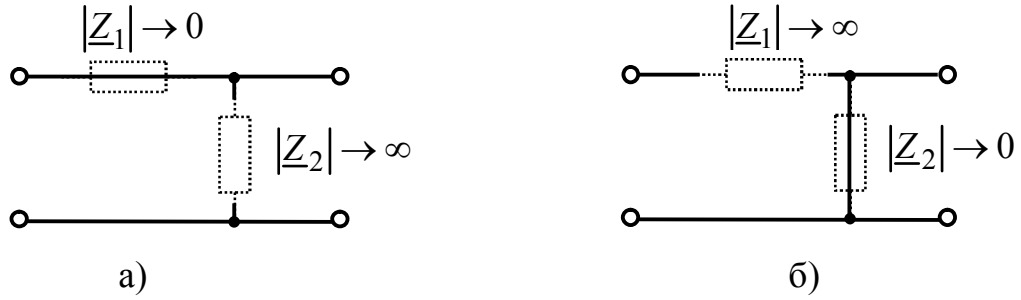


Рис. 1.6 — Эквивалентные схемы Г-образного звена ФНЧ типа « k » при $\omega \rightarrow 0$ (а) и $\omega \rightarrow \infty$ (б)

Граничные значения частот, на которых выполняется условие прозрачности (1.4), найдем из уравнений

$$\frac{Z_1(\omega_{\text{rp1}})}{4Z_2(\omega_{\text{rp1}})} = -1; \quad \frac{Z_1(\omega_{\text{rp2}})}{4Z_2(\omega_{\text{rp2}})} = 0. \quad (1.6)$$

Подставив (1.5) в (1.6), найдем частоты ω_{rp1} и ω_{rp2} фильтра нижних частот

$$\omega_{\text{rp1}} = \frac{2}{\sqrt{LC}}; \quad \omega_{\text{rp2}} = 0. \quad (1.7)$$

Выражения для амплитудно-частотной $a(\omega)$ и фазочастотной $b(\omega)$ характеристик Т- и П-образных звеньев ФНЧ типа « k » имеют вид [2, 4]:

— в полосе прозрачности фильтра:

$$a(\omega) = 0;$$

$$b(\omega) = \arccos \left(1 - 2 \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{rp}}} \right)^2 \right); \quad (1.8)$$

— в полосе затухания фильтра:

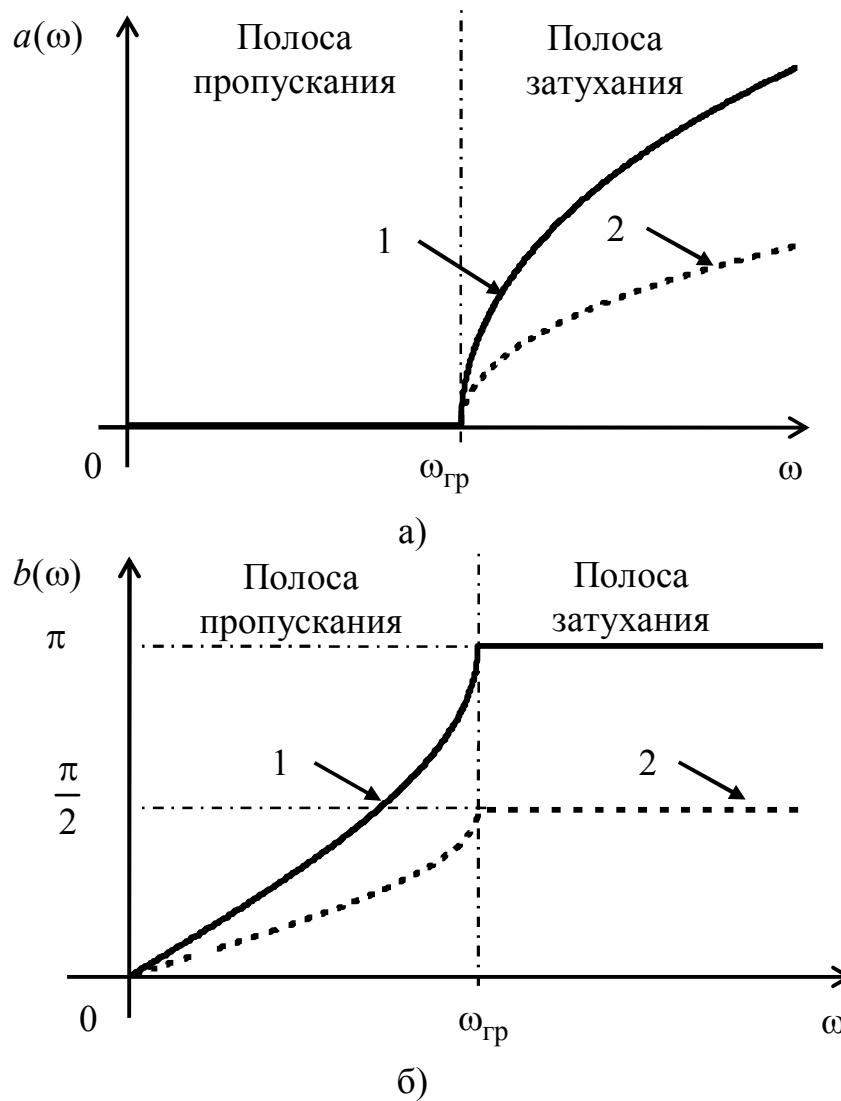
$$a(\omega) = \operatorname{arch} \left| 1 - 2 \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{rp}}} \right)^2 \right|; \quad (1.9)$$

$$b(\omega) = \pi,$$

В соотношениях (1.8) и (1.9) $a(\omega)$ выражается в неперах, $b(\omega)$ — в радианах. Построенные по формулам (1.8) и (1.9) АЧХ и ФЧХ ФНЧ показаны на рис. 1.7.

Показанные частотные характеристики справедливы только при согласованном включении фильтра, то есть при сопротивлении нагрузки, равном характеристическому.

Проведем анализ возможности осуществления на практике согласования фильтра с нагрузкой во всей полосе частот.



1 — Т-образное и П-образное звенья; 2 — Г-образное звено

Рис. 1.7 — АЧХ (а) и ФЧХ (б) идеального ФНЧ типа « k »

Характеристические сопротивления ФНЧ типа « k » вычисляются по формулам [2, 4]:

для Т-образного звена
$$\underline{Z}_T = \rho \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{гр}} \right)^2}; \quad (1.10)$$

для П-образного звена
$$\underline{Z}_П = \frac{\rho}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{гр}} \right)^2}}, \quad (1.11)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$.

Для Т-образного звена при частоте $\omega = 0$ сопротивление $\underline{Z}_T = \rho$. В полосе пропускания (при $\omega < \omega_{гр}$) выполняется неравенство $1 - (\omega/\omega_{гр})^2 > 0$. В этом случае сопротивление $\underline{Z}_T$ является действительной величиной, зависящей от частоты, и, следовательно, носит резистивный характер. В полосе затухания

(при $\omega > \omega_{гр}$) выполняется неравенство $1 - (\omega/\omega_{гр})^2 < 0$. В этом случае сопротивление $\underline{Z}_T$ является мнимой величиной, модуль которой увеличивается с ростом частоты, что является признаком индуктивного характера. Аналогично рассмотрев П-образное звено, получим, что в полосе пропускания $\underline{Z}_П$ имеет резистивный характер, а в полосе затухания — емкостной. На рис. 1.8 показаны зависимости модулей характеристических сопротивлений $\underline{Z}_T$ и $\underline{Z}_П$ от частоты.

Чтобы на практике получить АЧХ и ФЧХ фильтра, показанные на рис. 1.7, необходимо использовать нагрузки, сопротивления которых также зависят от частоты, как и характеристические сопротивления $\underline{Z}_T$ и $\underline{Z}_П$.

В реальных схемах используют нагрузки фильтра, сопротивления которых носят резистивный характер и практически не зависят от частоты. Поэтому экспериментальные АЧХ и ФЧХ фильтра будут отличаться от теоретических.

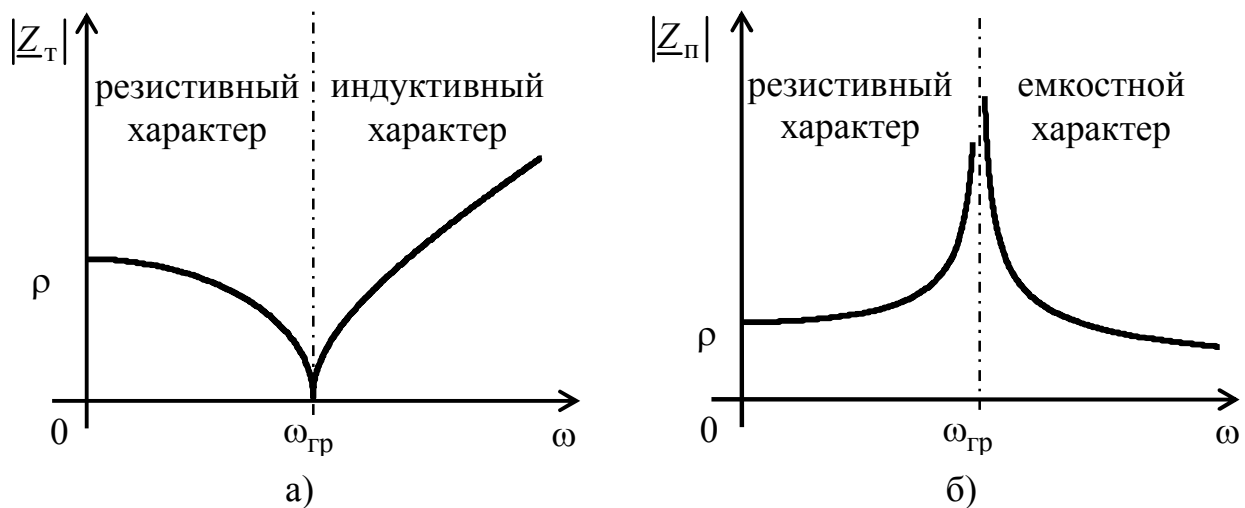


Рис. 1.8 — Зависимости модулей характеристических сопротивлений Т-образного (а) и П-образного (б) звеньев ФНЧ типа « k » от частоты

Эти отличия выражаются в следующем: затухание в полосе пропускания отличается от нуля; граничная частота $\omega_{гр}$ выражена нечетко; ФЧХ в полосе затухания меньше π для Т- и П-образных звеньев (меньше $\pi/2$ для Г-образного звена). АЧХ $K(\omega)$ реального ФНЧ типа « k » от частоты при различных сопротивлениях нагрузки R_H показаны на рис. 1.9.

Из рис. 1.9 видно, что АЧХ фильтра наиболее близка к идеальной при сопротивлении нагрузки R_H , равным ρ . Поэтому на практике выбирают именно такую величину сопротивления нагрузки

$$R_H = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.12)$$

Элементы фильтра L и C при заданных граничной частоте $\omega_{гр} = 2\pi f_{гр}$ и сопротивлении нагрузки R_H находят путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \omega_{\text{гр}} = \frac{2}{\sqrt{LC}}; \\ R_{\text{н}} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \end{cases} \quad (1.13)$$

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$L = \frac{2R_{\text{н}}}{\omega_{\text{гр}}}; \quad C = \frac{2}{R_{\text{н}}\omega_{\text{гр}}}.$$

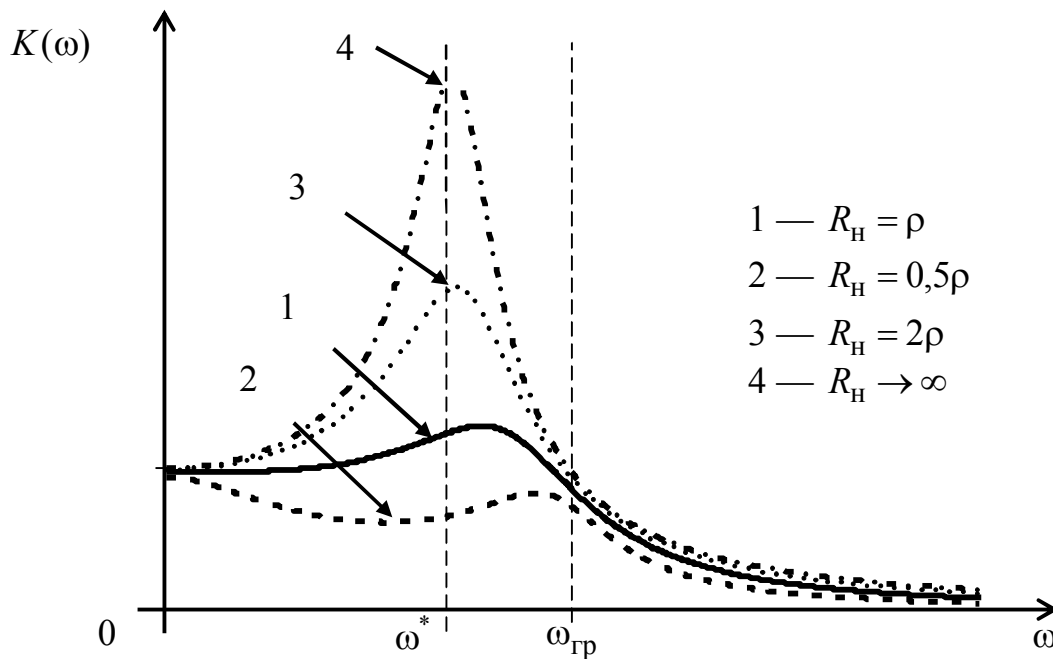


Рис. 1.9 — АЧХ ФНЧ типа « k » при различных сопротивлениях нагрузки $R_{\text{н}}$

Из рис. 1.9 также видно, что при сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$, значительно превышающем ρ , наблюдается резкое увеличение («выброс») коэффициента передачи на частоте ω^* , что объясняется наличием резонанса в последовательном колебательном контуре, образованным реактивными элементами продольной и поперечной ветвей фильтра. Значение частоты ω^* для Т-образного звена рассчитывается по формуле Томпсона

$$\omega^* = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{2}C}} = \frac{\omega_{\text{гр}}}{\sqrt{2}}. \quad (1.14)$$

К достоинствам ФНЧ типа « k » относят простоту реализации, а также монотонный характер увеличения затухания в полосе затухания. К недостаткам — значительную зависимость характеристического сопротивления от частоты, что затрудняет согласование с нагрузкой во всей полосе частот, а также недостаточную крутизну амплитудно-частотной характеристики при переходе через граничную частоту $\omega_{\text{гр}}$.

1.3. Предварительный расчет

1.3.1. Рассчитать частоты $\omega_{\text{гр}}$ ($f_{\text{гр}}$) Г-образного звена ФНЧ по формуле (1.13). Параметры элементов схемы: $L_1 = L/2 = 130$ мкГ; $C_1 = C/2 = 0,05$ мкФ.

1.3.2. Рассчитать величину ρ по формуле (1.12).

1.3.3. Рассчитать частоту «выброса» АЧХ фильтра ω^* , используя (1.14).

1.4. Описание лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки для исследования фильтров типа « k » и типа « m » показана на рис. 1.10.



Рис. 1.10 — Функциональная схема лабораторной установки для исследования фильтров типа « k » и типа « m »

Лабораторная установка состоит из макета, генератора низкой частоты НЧ и вольтметра переменного тока. На вход макета подается гармоническое напряжение заданной частоты от генератора НЧ. С помощью вольтметра измеряются действующие значения напряжения на входе и выходе исследуемых фильтров. Выбор исследуемого фильтра производится с помощью тумблеров.

Внешний вид лабораторного макета для исследования характеристик ФНЧ типа « k » показана на рис. 1.11. Часть макета, используемая в данной лабораторной работе, состоит из двух Г-образных звеньев ФНЧ, тумблеров $S1$ и $S2$, а также переключателей $S5$ и «Нагрузка $R_{\text{н}}$ ». Тумблер $S1$ предназначен для соединения двух Г-образных звеньев в Т-образное звено.

1.5. Порядок выполнения работы

1.5.1. Измерение АЧХ Г-образного звена без дополнительного сопротивления потерь $R_{\text{н}}$ при нагрузке $R_{\text{н}} = \rho$

1.5.1.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г1. Тумблеры $S1$, $S2$ и переключатель $S5$ перевести в положения «1». Переключатель «Нагрузка $R_{\text{н}}$ » установить в положение « ρ ».

1.5.1.2. Используя вольтметр переменного тока, установить на входе фильтра (гнездо Г1) действующее значение напряжения, равное $U_{\text{вх}} = 1$ В, на частоте $0,1f_{\text{гр}}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

1.5.1.3. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{\text{гр}}$ до $2f_{\text{гр}}$ с шагом $0,1f_{\text{гр}}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г1 и Г3. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

1.5.2. Измерение АЧХ Г-образного звена с сопротивлением потерь $R_{\text{н}}$ при нагрузке $R_{\text{н}} = \rho$

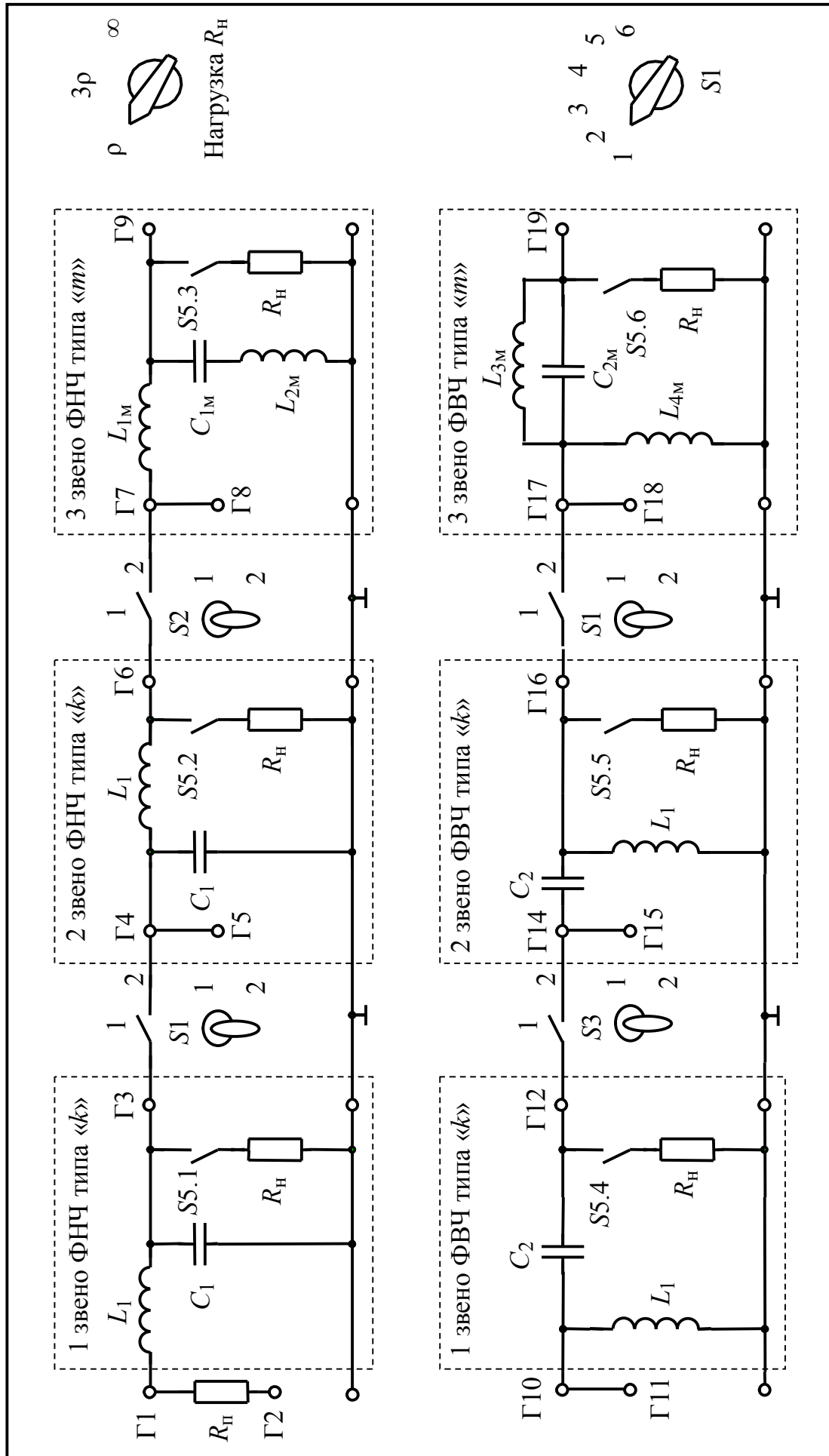


Рис. 1.11 — Внешний вид лабораторного макета для исследования фильтров типа «k» и типа «m»

1.5.2.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г2.

1.5.2.2. Используя вольтметр, установить на входе фильтра (гнездо Г2) действующее значение напряжения, равное $U_{\text{вх}} = 1$ В. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

1.5.2.3. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{\text{гр}}$ до $2f_{\text{гр}}$ с шагом $0,1f_{\text{гр}}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г2 и Г3. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — Результаты измерений

Частота f , Гц	$U_{\text{вых}} =$, В				
	Г-образное звено при $R_{\text{н}} = \rho$		Т-образное звено		
	без $R_{\text{п}}$	с $R_{\text{п}}$	при $R_{\text{н}} = \rho$	при $R_{\text{н}} = 3\rho$	при $R_{\text{н}} = \infty$
$0,1f_{\text{гр}}$					
$0,2f_{\text{гр}}$					
...					
$2f_{\text{гр}}$					

1.5.3. Измерение АЧХ Т-образного звена без дополнительного сопротивления потерь $R_{\text{п}}$ при нагрузке $R_{\text{н}} = \rho$

1.5.3.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г1.

1.5.3.2. Установить тумблеры $S1$ и переключатель $S5$ в положения «2».

1.5.3.3. Выполнить пункт 1.5.1.2.

1.5.3.4. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{\text{гр}}$ до $2f_{\text{гр}}$ с шагом $0,1f_{\text{гр}}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г1 и Г6. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

1.5.4. Измерение АЧХ Т-образного звена без дополнительного сопротивления потерь $R_{\text{п}}$ при нагрузке $R_{\text{н}} = 3\rho$

1.5.4.1. Установить переключатель «Нагрузка $R_{\text{н}}$ » в положение « 3ρ ».

1.5.4.2. Выполнить пункты 1.5.1.2 и 1.5.3.4.

1.5.5. Измерение АЧХ Т-образного звена без дополнительного сопротивления потерь $R_{\text{п}}$ при нагрузке $R_{\text{н}} = \infty$

1.5.5.1. Установить переключатель «Нагрузка $R_{\text{н}}$ » в положение « ∞ ».

1.5.5.2. Выполнить пункты 1.5.1.2 и 1.5.3.4.

1.6. Обработка результатов измерений

1.6.1. Рассчитать коэффициент передачи и затухание в децибелах исследованных фильтров на всех частотах, используя данные таблицы 1.1, с помощью формул (1.1) и (1.2) соответственно. Результаты расчетов занести в таб-

лицу 1.2.

1.6.2. Рассчитать теоретические АЧХ фильтра нижних частот типа « k » $a(f)$ и $K(f)$ по формулам (1.8), (1.9) и (1.2) соответственно. Результаты расчетов занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 — Экспериментальные и теоретические АЧХ

Частота f , Гц	Эксперимент		Теория	
	$K(f)$	$a(f)$, дБ	$K(f)$	$a(f)$, дБ
$0,1f_{\text{гр}}$				
$0,2f_{\text{гр}}$				
...				
$2f_{\text{гр}}$				

1.7. Оформление отчета

1.7.1. Сформулировать цель работы.

1.7.2. Привести схему лабораторной установки.

1.7.3. Привести результаты предварительного расчета.

1.7.4. Привести таблицы с экспериментальными данными и результатами теоретического расчета, а также графики полученных зависимостей на одном рисунке и в одном масштабе.

1.8. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее.

1.8.1. Сопоставить результаты расчетов и эксперимента.

1.8.2. Указать значение сопротивления нагрузки, при которой АЧХ ФНЧ типа « k » наиболее равномерна в полосе пропускания.

1.9. Контрольные вопросы

1.9.1. Какие фильтры называют фильтрами нижних частот?

1.9.2. Как обозначаются элементы ФНЧ типа « k » в схемах. Привести примеры.

1.9.3. Как рассчитать граничные частоты ФНЧ типа « k »?

1.9.4. Назвать особенность фильтров типа « k ». Каковы их достоинства и недостатки? Как влияет на амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики фильтра сопротивление потерь катушек индуктивности?

1.9.5. Дать определение характеристическому сопротивлению фильтра. Рассмотреть его зависимость от частоты для реактивных звеньев ФНЧ.

1.9.6. Как влияет на амплитудно-частотную характеристику фильтра величина сопротивления нагрузки?

1.9.7. Объяснить наличие «выброса» амплитудно-частотной характеристики ФНЧ типа « k » при больших значениях сопротивления нагрузки.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ ВЕРХНИХ ЧАСТОТ ТИПА « k »

2.1. Цель работы

Исследования амплитудно-частотных характеристик реактивных фильтров верхних частот типа « k ».

2.2. Теоретические сведения

Фильтр верхних частот — четырехполюсник, полоса пропускания которого находится в диапазоне частот от некоторой граничной частоты $\omega_{\text{гр}}$ до $\omega \rightarrow \infty$, а полоса затухания — в диапазоне частот от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_{\text{гр}}$. Амплитудно-частотные характеристики идеального фильтра верхних частот (ФВЧ) показаны на рис. 2.1.

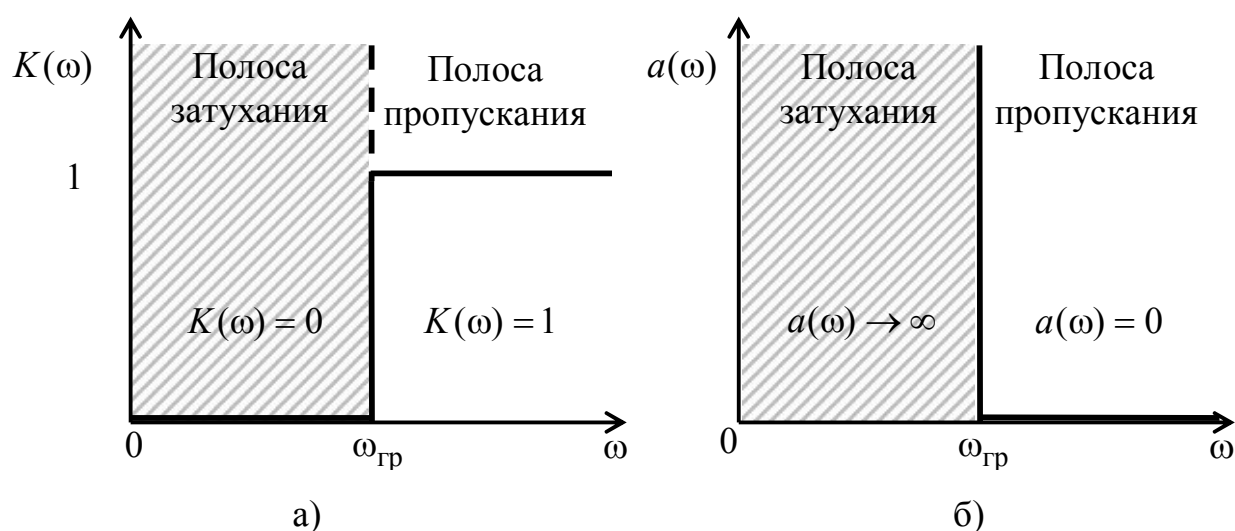


Рис. 2.1 — Зависимость коэффициента передачи по напряжению (а) и затухания (б) идеального ФВЧ от частоты

Для построения реактивных фильтров используют Г-, Т-, и П-образные звенья (рис. 1.3). При этом Т- и П-образные звенья получают путем каскадного соединения Г-образных звеньев. Для реализации реактивного ФВЧ типа « k » необходимо поставить в продольные ветви фильтра емкости, а в поперечные — индуктивности (рис. 2.2). При этом сопротивления $\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ определяются:

$$\underline{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C}; \quad \underline{Z}_2 = j\omega L. \quad (2.1)$$

Проведем качественный анализ Г-образного звена ФВЧ типа « k » (рис. 2.2а) в области низких и высоких частот. Последовательное соединение

продольной емкости и поперечной индуктивности можно рассматривать как частотно-зависимый делитель напряжения (рис. 2.3).

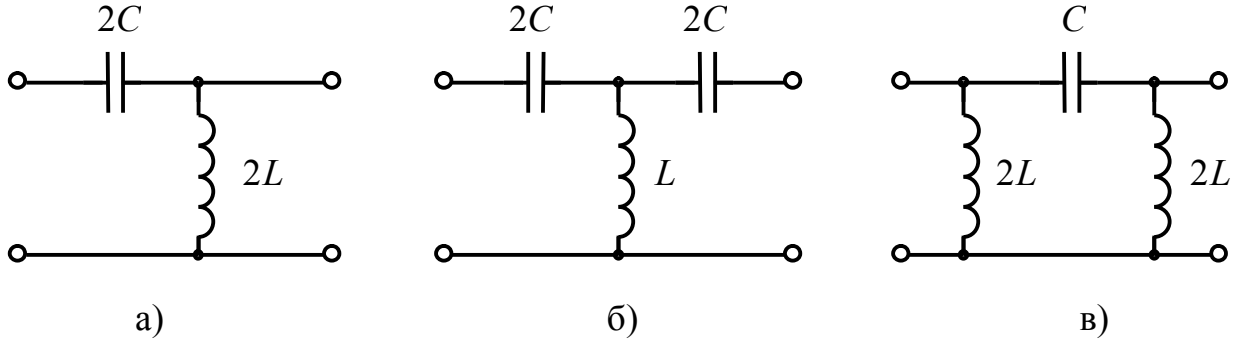


Рис. 2.2 — Схемы фильтров верхних частот типа « k »:
(а) Г-образное звено; (б) Т-образное звено; (в) П-образное звено.

Рассмотрим область низких частот. При стремлении частоты к нулю ($\omega \rightarrow 0$) $|\underline{Z}_1| \rightarrow \infty$, а $|\underline{Z}_2| \rightarrow 0$. При этом коэффициент передачи фильтра $K(\omega) \rightarrow 0$, а затухание — $a(\omega) \rightarrow \infty$ (рис. 2.3а). Теперь рассмотрим область высоких частот. При стремлении частоты к бесконечности ($\omega \rightarrow \infty$) $|\underline{Z}_1| \rightarrow 0$, а $|\underline{Z}_2| \rightarrow \infty$. При этом коэффициент передачи фильтра $K(\omega) \rightarrow 1$, а затухание — $a(\omega) \rightarrow 0$ (см. рис. 2.3б).



Рис. 2.3 — Эквивалентные схемы Г-образного звена ФВЧ типа « k » в области низких (а) и высоких (б) частот

Граничные значения частот, на которых выполняется условие прозрачности (1.4), найдем из уравнений (1.6). Подставляя (2.1) в (1.6), найдем частоты $\omega_{гр1}$ и $\omega_{гр2}$ ФВЧ типа « k »

$$\omega_{гр1} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}; \quad \omega_{гр2} \rightarrow \infty. \quad (2.2)$$

Амплитудно-частотная $a(\omega)$ и фазочастотная $b(\omega)$ характеристики Т- и П-образных звеньев идеального реактивного ФВЧ определяются [2, 3]:

— в полосе прозрачности:

$$a(\omega) = 0; \quad b(\omega) = -\arccos\left(1 - 2\left(\frac{\omega_{гр}}{\omega}\right)^2\right); \quad (2.3)$$

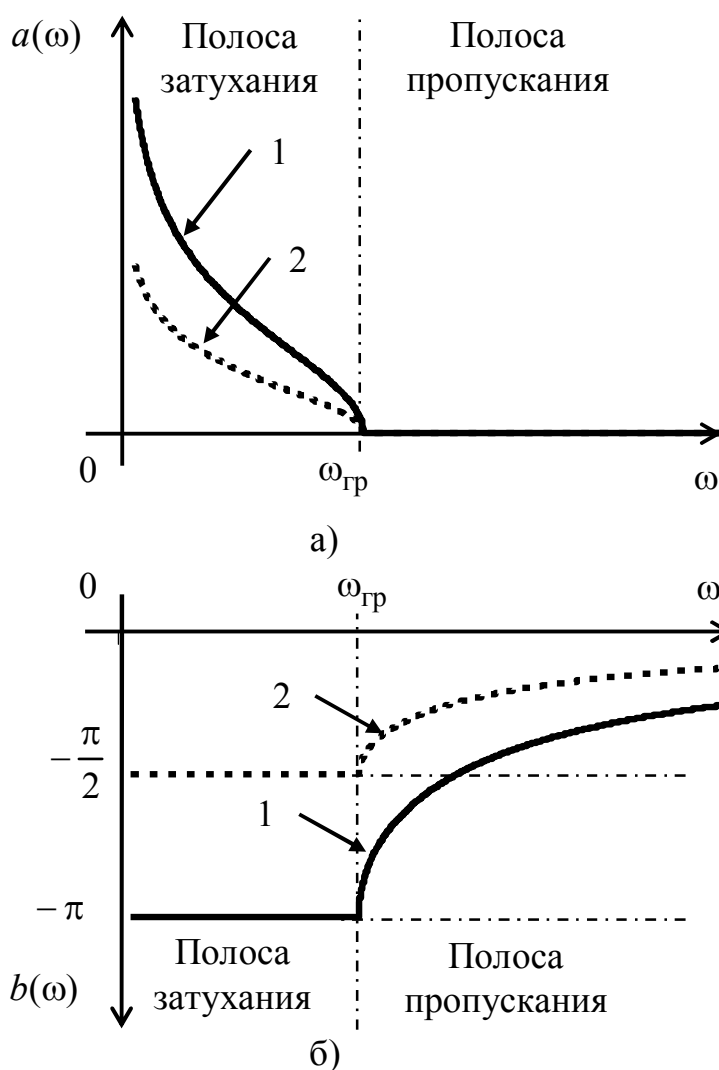
— в полосе затухания:

$$a(\omega) = \operatorname{arch} \left| 1 - 2 \left(\frac{\omega_{\text{гр}}}{\omega} \right)^2 \right|; \quad (2.4)$$

$$b(\omega) = -\pi.$$

В формулах (2.3) и (2.4) $a(\omega)$ измеряется в неперах, $b(\omega)$ — в радианах.

Построенные по формулам (2.3) и (2.4) частотные характеристики ФВЧ показаны на рис. 2.4. Эти частотные характеристики справедливы только при согласованном включении фильтра, то есть при сопротивлении нагрузки, равном характеристическому.



1 — Т-образное и П-образное звенья; 2 — Г-образное звено

Рис. 2.4 — АЧХ (а) и ФЧХ (б) идеального ФВЧ типа «k»

Проведем анализ возможности согласования фильтра с нагрузкой во всей полосе частот. Характеристические сопротивления ФВЧ типа «k» для Т-образного и П-образного звеньев вычисляются по формулам [2, 3]

$$\underline{Z}_T = \rho \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{гр}}{\omega} \right)^2} ; \quad (2.5)$$

$$\underline{Z}_\Pi = \frac{\rho}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{гр}}{\omega} \right)^2}} . \quad (2.6)$$

Для Т-образного звена ФВЧ типа « k » при частоте $\omega = 0$ сопротивление $\underline{Z}_T \rightarrow \infty$. В полосе затухания (при $\omega < \omega_{гр}$) выполняется неравенство $1 - (\omega_{гр}/\omega)^2 < 0$. В этом случае сопротивление $\underline{Z}_T$ представляет собой мнимую величину, модуль которой уменьшается с ростом частоты, что является признаком емкостного характера. В полосе пропускания (при $\omega > \omega_{гр}$) выполняется неравенство $1 - (\omega_{гр}/\omega)^2 > 0$. В этом случае сопротивление $\underline{Z}_T$ является действительной величиной, зависящей от частоты, и, следовательно, носит резистивный характер. Аналогично рассмотрев П-образное звено, получим, что в полосе пропускания $\underline{Z}_\Pi$ имеет резистивный характер, а в полосе затухания — индуктивный.

На рис. 2.5 показаны зависимости модулей характеристических сопротивлений $\underline{Z}_T$ и $\underline{Z}_\Pi$ от частоты.

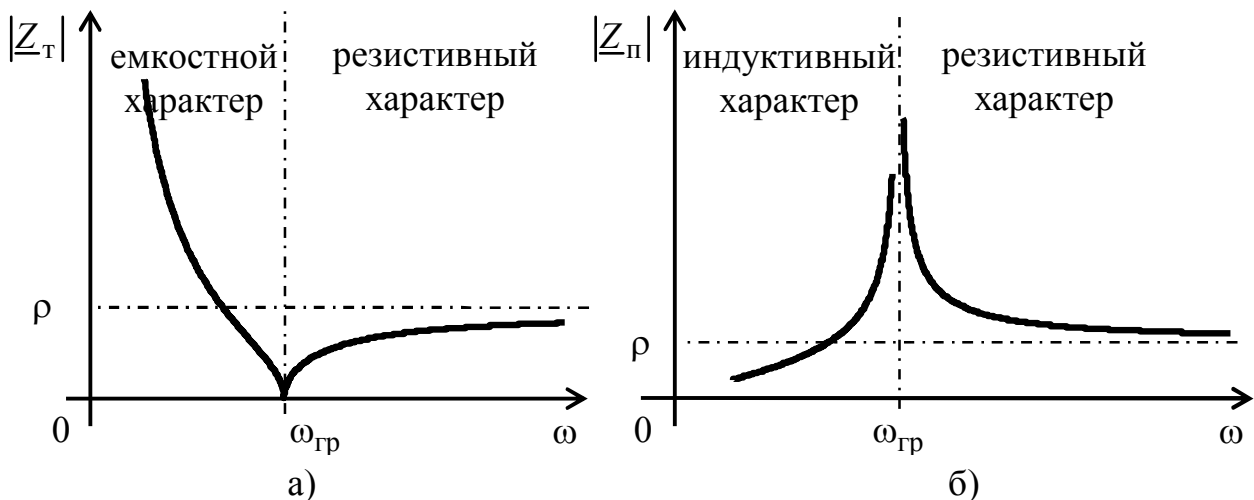


Рис. 2.5 — Зависимости модулей характеристических сопротивлений Т-образного (а) и П-образного (б) звеньев ФВЧ типа « k » от частоты

Чтобы на практике получить АЧХ и ФЧХ фильтра в соответствии с рис. 2.4, необходимо использовать такое сопротивление нагрузки, которое изменялось при изменении частоты по таким же законам, как и характеристические сопротивления $\underline{Z}_T$ и $\underline{Z}_\Pi$.

В реальных схемах используют нагрузки фильтра, сопротивления которых носит резистивный характер и практически не зависит от частоты. Следовательно, экспериментальные АЧХ и ФЧХ фильтра будут отличаться от теоретических.

Кроме того, на практике величина сопротивления потерь фильтра не

равна нулю, поэтому характеристики фильтра, согласованного с нагрузкой, отличаются от теоретических. Эти отличия выражаются в следующем: затухание в полосе пропускания не равно нулю; граничная частота $\omega_{\text{гр}}$ выражена нечетко; ФЧХ в полосе затухания меньше π для Т- и П-образных звеньев (меньше $\pi/2$ для Г-образного звена).

Зависимости коэффициента передачи реального ФВЧ типа « k » от частоты при различных сопротивлениях нагрузки $R_{\text{н}}$ показаны на рис. 2.6.

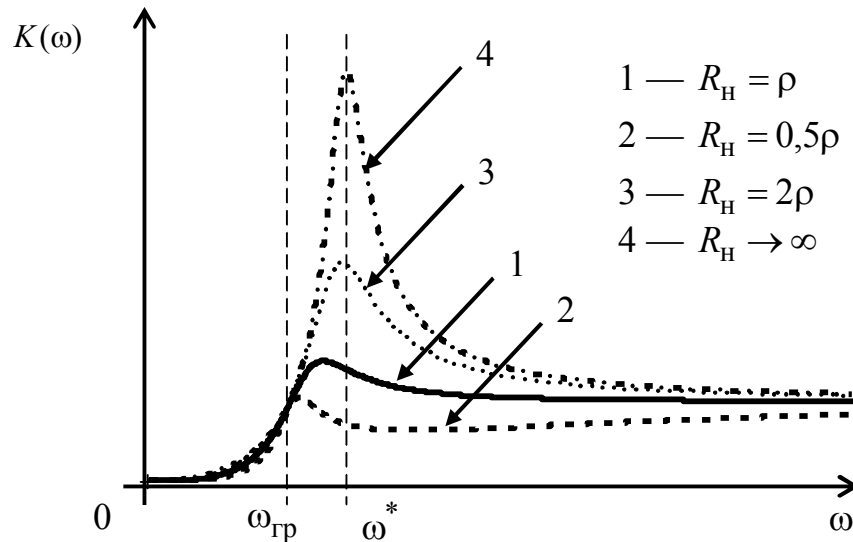


Рис. 2.6 — Зависимость коэффициента передачи по напряжению ФВЧ типа « k » от частоты при различных сопротивлениях нагрузки $R_{\text{н}}$

Из рис. 2.6 видно, что АЧХ фильтра верхних частот наиболее близка к идеальной при сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$, равном ρ . Поэтому на практике выбирают величину сопротивления нагрузки, равную

$$R_{\text{н}} = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.7)$$

Элементы фильтра L и C при заданных граничной частоте $\omega_{\text{гр}} = 2\pi f_{\text{гр}}$ и сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$ находят путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \omega_{\text{гр}} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}; \\ R_{\text{н}} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$L = \frac{R_{\text{н}}}{2\omega_{\text{гр}}}; \quad C = \frac{1}{2R_{\text{н}}\omega_{\text{гр}}}.$$

Из рис. 2.6 также видно, что при сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$, значительно превышающем ρ , наблюдается резкое увеличение («выброс») коэффициента передачи на частоте ω^* , что объясняется наличием резонанса в

последовательном колебательном контуре, образованного из реактивных элементов продольной и поперечной ветвей фильтра. Значение частоты ω^* для Т-образного звена рассчитывается по формуле Томпсона

$$\omega^* = \frac{1}{\sqrt{L2C}} = \sqrt{2}\omega_{\text{гр}}. \quad (2.9)$$

К достоинствам ФВЧ типа « k » относят простоту реализации, а также монотонный характер увеличения затухания в полосе затухания. К недостаткам — значительная зависимость характеристического сопротивления от частоты, что затрудняет согласование с нагрузкой во всей полосе частот, а также недостаточную крутизну амплитудно-частотной характеристики при переходе через граничную частоту $\omega_{\text{гр}}$.

2.3. Предварительный расчет

2.3.1. Рассчитать частоты $\omega_{\text{гр}}$ ($f_{\text{гр}}$) Г-образного звена ФВЧ по формуле (2.8). Параметры элементов схемы: $L_2 = 2L = 130$ мкГ; $C_2 = 2C = 0,05$ мкФ.

2.3.2. Рассчитать характеристическое сопротивление ρ по формуле (2.7).

2.3.3. Рассчитать частоту ω^* , на которой наблюдается «выброс» амплитудно-частотной характеристики фильтра, используя соотношение (2.9).

2.4. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа №8 выполняется на том же макете, что и предыдущая работа. Внешний вид лабораторного макета с органами управления для исследования характеристик фильтра верхних частот типа « k » показан на рис. 1.11.

Часть макета, используемая в лабораторной работе, состоит из двух Г-образных звеньев ФВЧ, тумблеров $S3$ и $S4$, а также переключателей $S5$ и «Нагрузка $R_{\text{н}}$ ». Тумблер $S3$ предназначен для соединения двух Г-образных звеньев в П-образное звено.

2.5. Порядок выполнения работы

2.5.1. Измерение АЧХ Г-образного звена при нагрузке $R_{\text{н}} = \rho$

2.5.1.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г10. Тумблеры $S3$, $S4$ перевести в положение «1», а переключатель $S5$ — в положение «4». Переключатель «Нагрузка $R_{\text{н}}$ » перевести в положение « ρ ».

2.5.1.2. Используя вольтметр переменного тока, установить на входе фильтра (гнездо Г10) действующее значение напряжения, равное $U_{\text{вх}} = 1$ В, на частоте $0,1f_{\text{гр}}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

2.5.1.3. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{\text{гр}}$ до $2f_{\text{гр}}$ с шагом $0,1f_{\text{гр}}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г11 и Г12. Результаты измерений

занести в таблицу 2.1.

2.5.2. Измерение АЧХ П-образного звена при нагрузке $R_H = \rho$

2.5.2.1. Подключить выход генератора к гнезду Г11.

2.5.2.2. Установить тумблер $S3$ в положение «2», а переключатель $S5$ — в положение «5».

2.5.2.3. Выполнить пункт 2.5.1.2.

2.5.2.4. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{гр}$ до $2f_{гр}$ с шагом $0,1f_{гр}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г11 и Г16. Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 — Результаты измерений

Частота f , Гц	$U_{\text{вых}}$, В			
	Г-образное звено	П-образное звено		
	при $R_H = \rho$	при $R_H = \rho$	при $R_H = 3\rho$	при $R_H = \infty$
$0,1f_{гр}$				
$0,2f_{гр}$				
...				
$2f_{гр}$				

2.5.3. Измерение АЧХ П-образного звена при нагрузке $R_H = \rho$

2.5.3.1. Установить переключатель «Нагрузка R_H » в положение «3 ρ ».

2.5.3.2. Выполнить пункты 2.5.1.2 и 2.5.2.4.

2.5.4. Измерение АЧХ П-образного звена при нагрузке $R_H = \rho$

2.5.4.1. Установить переключатель «Нагрузка R_H » в положение « ∞ ».

2.5.4.2. Выполнить пункты 2.5.1.2 и 2.5.2.4.

2.6. Обработка результатов измерений

2.6.1. Рассчитать коэффициент передачи и затухание в децибелах исследованных фильтров на всех частотах согласно таблице 2.1, используя формулы (1.1) и (1.2) соответственно. Результаты расчетов занести в таблицу 2.2.

2.6.2. Рассчитать теоретические АЧХ фильтра верхних частот типа « k » $a(f)$ и $K(f)$ по формулам (2.3), (2.4) и (1.2) соответственно. Результаты расчетов занести в таблицу 2.2.

2.7. Оформление отчета

2.7.1. Сформулировать цель работы.

2.7.2. Привести схему лабораторной установки.

2.7.3. Привести результаты предварительного расчета.

2.7.4. Привести таблицы с экспериментальными данными и результатами теоретического расчета, а также графики полученных зависимостей на одном рисунке и в одном масштабе.

Таблица 2.2 — Экспериментальные и теоретические АЧХ

Частота f , Гц	Эксперимент		Теория	
	$K(f)$	$a(f)$, дБ	$K(f)$	$a(f)$, дБ
$0,1f_{гр}$				
$0,2f_{гр}$				
...				
$2f_{гр}$				

2.8. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее.

2.8.1. Результаты сравнения расчетов и эксперимента.

2.8.2. Указать значение сопротивления нагрузки, при которой амплитудно-частотная характеристика ФВЧ типа « k » наиболее равномерна в полосе пропускания.

2.9. Контрольные вопросы

2.9.1. Какие фильтры называют фильтрами верхних частот.

2.9.2. Как обозначаются элементы ФВЧ типа « k » в различных схемах.

Привести примеры.

2.9.3. Как рассчитать граничные частоты ФВЧ типа « k »?

2.9.4. Назвать особенность фильтров типа « k ». Каковы их достоинства и недостатки? Как влияет на амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики фильтра сопротивление потерь катушек индуктивности?

2.9.5. Дать определение характеристического сопротивления фильтра. Рассмотреть его зависимость от частоты для реактивных звеньев ФВЧ.

2.9.6. Как влияет на амплитудно-частотную характеристику фильтра величина сопротивления нагрузки?

2.9.7. Объяснить наличие «выброса» амплитудно-частотной характеристики ФВЧ типа « k » при больших значениях сопротивления нагрузки.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ ЧАСТОТ ТИПА « m »

3.1. Цель работы

Исследования амплитудно-частотных характеристик фильтров нижних и верхних частот типа « m », а также комбинированных фильтров из звеньев типа « k » и типа « m ».

3.2. Теоретические сведения

Недостатками фильтров типа « k » являются: плавный переход от полосы пропускания к полосе затухания и невозможность хорошего согласования с нагрузкой даже в ПП фильтра. Для устранения недостатков фильтров типа « k » разработаны фильтры типа « m ».

Фильтрами нижних и верхних частот типа « m » называются фильтры, у которых одностипные реактивные элементы имеются, как в продольной, так и в поперечной ветвях (см. рис. 3.1б и 3.2б). Фильтры типа « m », как правило, не используются самостоятельно, а включаются каскадно с фильтрами типа « k ».

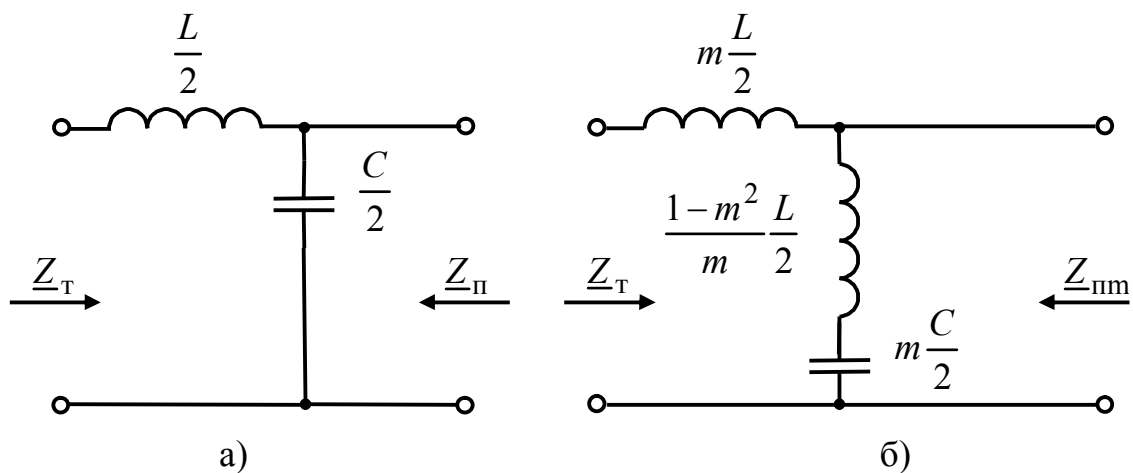


Рис. 3.1 — Схемы фильтров нижних частот: (а) фильтр-прототип типа « k » (б) последовательно-производный фильтр типа « m »

Наличие в схемах фильтров типа « m » дополнительных, по сравнению с фильтрами типа « k », элементов приводит к заметному различию их свойств. В фильтрах типа « m » на некоторой частоте коэффициент передачи оказывается близким к нулю. Например, в схеме на рис. 3.1б в поперечной ветви фильтра на некоторой частоте может возникнуть резонанс напряжений. При этом сопротивление поперечной ветви равно нулю, коэффициент передачи равен нулю, а затухание идеального фильтра стремится к бесконечности. Аналогично, для фильтра на рис. 3.2б на некоторой частоте в продольной ветви

фильтра может возникнуть резонанс токов. При этом сопротивление продольной ветви бесконечно большое, коэффициент передачи равен нулю, а затухание стремится к бесконечности. Частота, на которой затухание в фильтре типа « m » стремится к бесконечности, носит название частоты бесконечного затухания ω_∞ .

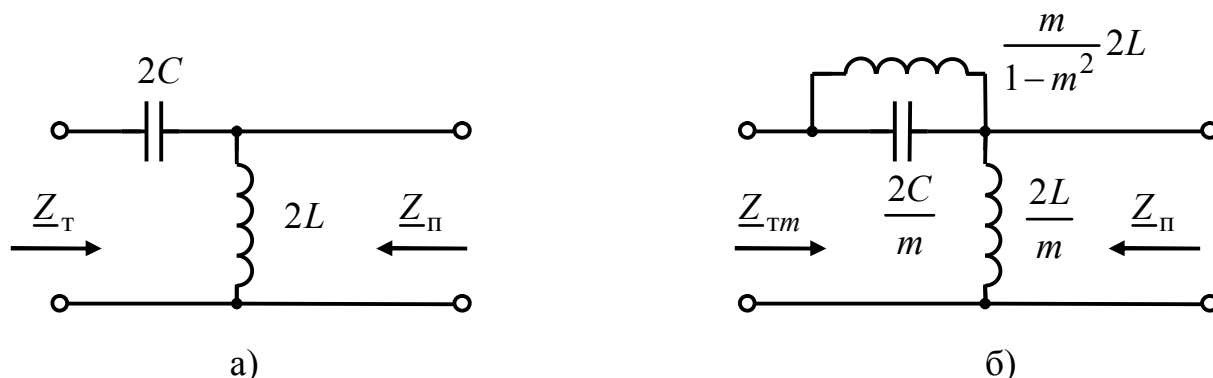


Рис. 3.2 — Схемы фильтров верхних частот: (а) фильтр-прототип типа « k »
(б) параллельно-производный фильтр типа « m »

Фильтры, содержащие ветвь с последовательным соединением реактивных элементов различных типов, называются последовательно-производными фильтрами типа « m » (рис. 3.1б).

Фильтры, содержащие ветвь с параллельным соединением реактивных элементов различных типов, называются параллельно-производными фильтрами типа « m » (см. рис. 3.2б).

Фильтры типа « m » получают из фильтров типа « k », которые называют фильтрами-прототипами, путем переноса части L или C из одной ветви в другую, как показано на рис. 3.3.

Соотношения между параметрами элементов фильтра типа « m » устанавливаются коэффициентом m , который может принимать значения в диапазоне $0 < m < 1$. При этом исходными являются параметры индуктивности и емкости соответствующего фильтра-прототипа типа « k », рассчитанного на заданные граничную частоту $\omega_{гр}$ и сопротивление нагрузки R_H (см. рис. 3.1 и 3.2).

При $m=1$ фильтр типа « m » вырождается в фильтр-прототип типа « k ». На практике создать конструкцию фильтра с коэффициентом $m < (0,3...0,35)$ затруднительно, поэтому обычно коэффициент m находится в интервале от 0,4 до 0,8.

Расчётные соотношения для элементов фильтров типа « m » получают из следующих условий: характеристическое сопротивление последовательно-производного фильтра типа « m » со стороны входа «Т» должно быть равно характеристическому сопротивлению со стороны «Т» исходного звена фильтра-прототипа типа « k ». При этом характеристическое сопротивление параллельно-производного фильтра типа « m » со стороны входа «П» должно быть равно характеристическому сопротивлению со стороны входа «П» исходного звена фильтра-прототипа типа « k ». Выполнение этого условия позволяет соединять каскадно фильтры типов « m » и « k » со стороны соответствующих входов и обеспечить согласование разнотипных звеньев при построении ком-

бинированных фильтров.

Получить расчетные формулы для параметров элементов последовательно-производных и параллельно-производных ФНЧ и ФВЧ типа « m » можно, если воспользоваться комплексными эквивалентными схемами замещения фильтра-прототипа и фильтра типа « m », найденные при соблюдении указанных условий (см. рис. 3.3) согласования характеристических сопротивлений.

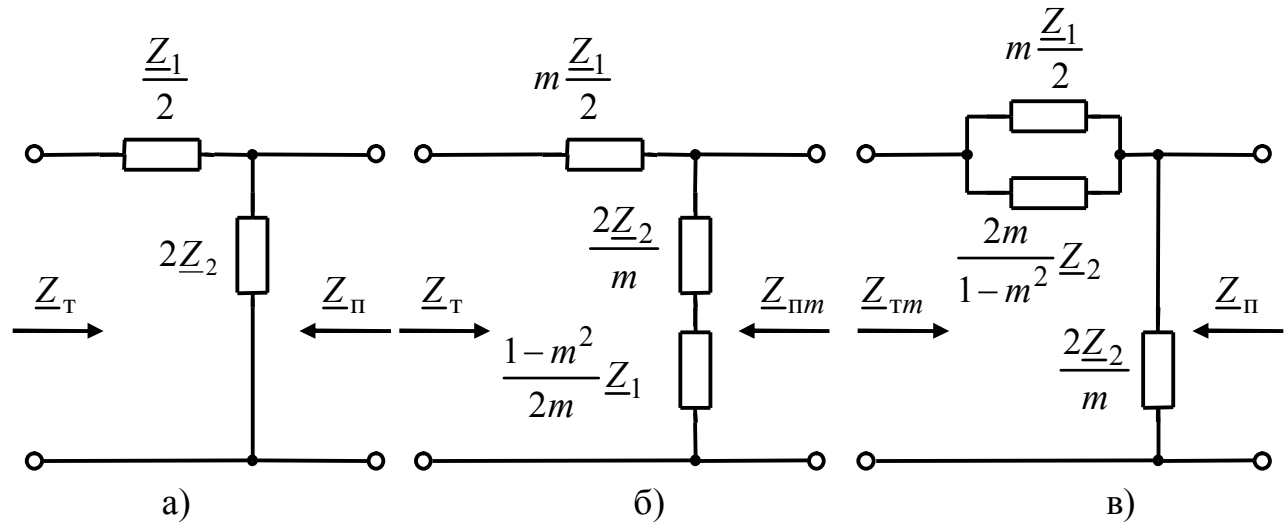


Рис. 3.3 — Эквивалентные комплексные схемы замещения фильтра-прототипа (а), последовательно-производного фильтра типа « m » (б), параллельно-производного фильтра типа « m » (в)

При выполнении указанных условий характеристическое сопротивление последовательно-производного фильтра со стороны входа «П» ($Z_{\text{пм}}$) и характеристическое сопротивление параллельно-производного фильтра со стороны входа «Т» ($Z_{\text{тм}}$) слабо зависят от частоты в полосе пропускания фильтра. При коэффициенте $m = 0,59$ обеспечивается лучшее, по сравнению с фильтром типа « k », согласование с нагрузкой в полосе пропускания фильтра. На частотах, непосредственно примыкающих к $\omega_{\text{гр}}$, модули характеристических сопротивлений $Z_{\text{тм}}$ и $Z_{\text{пм}}$ резко изменяют свои величины. Характеристические сопротивления ФНЧ типа « m » рассчитываются по формулам

$$Z_{\text{тм}}(\omega) = \frac{Z_{\text{Т}}}{\sqrt{1 - (1 - m^2) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{гр}}} \right)^2}};$$

$$Z_{\text{пм}}(\omega) = Z_{\text{П}} \sqrt{1 - (1 - m^2) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{гр}}} \right)^2},$$

где $Z_{\text{Т}} = \rho \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{гр}}} \right)^2}$; $Z_{\text{П}} = \rho / \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{гр}}} \right)^2}$; $\rho = \sqrt{L/C}$.

На рис. 3.4 показаны зависимости модулей характеристических сопро-

тивлений $\underline{Z}_T$ и $\underline{Z}_\Pi$ от частоты при различных коэффициентах m в полосе пропускания фильтров.

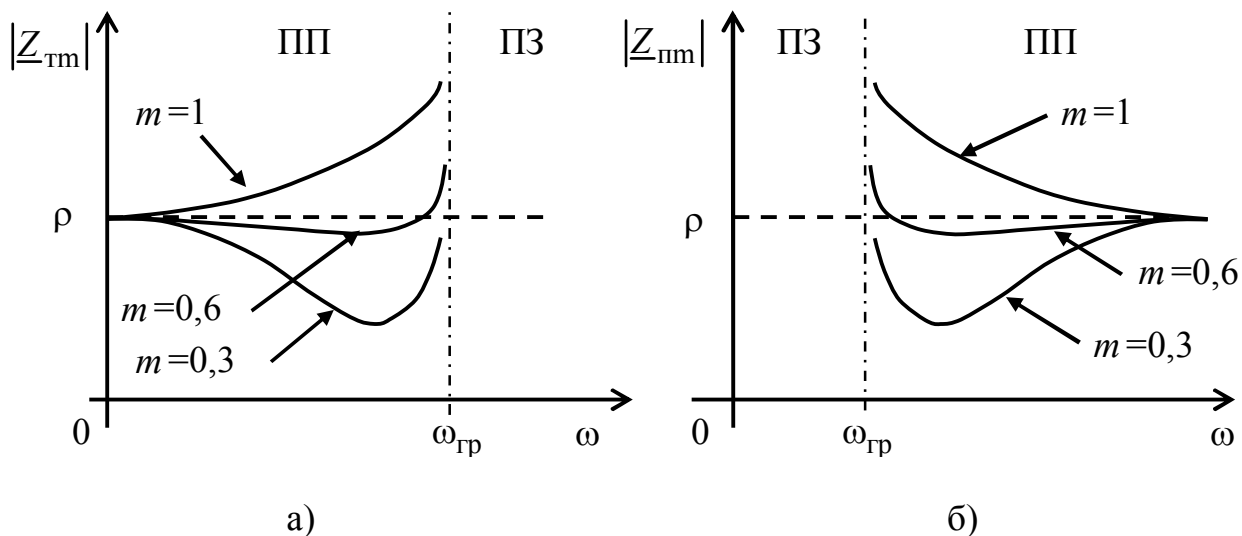


Рис. 3.4 — Зависимости модулей характеристических сопротивлений $\underline{Z}_{tm}$ и $\underline{Z}_{pim}$ от частоты в полосе пропускания: (а) последовательно-производного ФНЧ (б) параллельно-производного ФВЧ

Граничные частоты фильтров типа « m » совпадают с частотами фильтров-прототипов типа « k ».

Зависимости затухания $a(\omega)$ ФНЧ типа « m » при различных значениях m показаны на рис. 3.5.

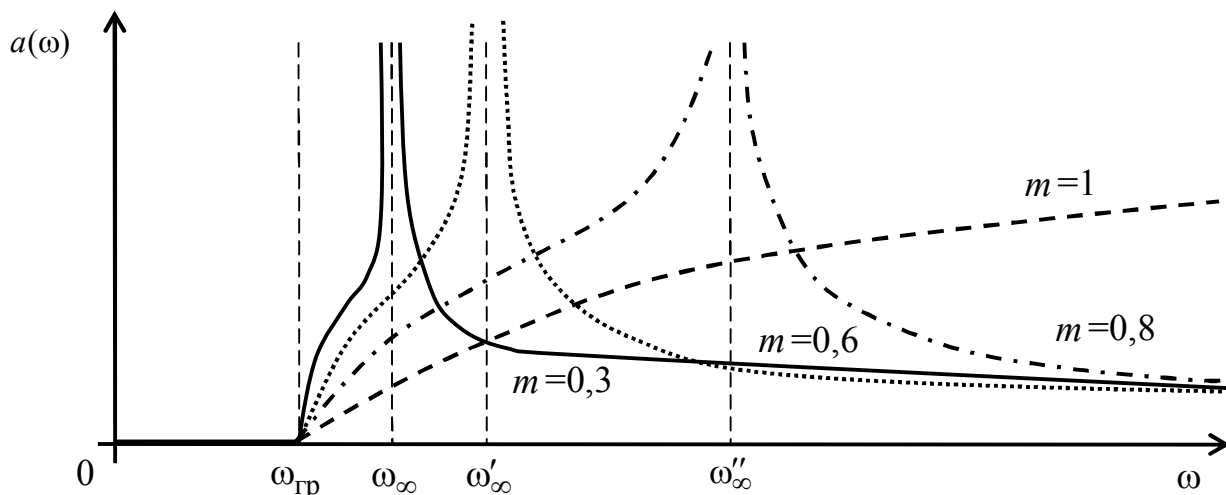


Рис. 3.5 — АЧХ ФНЧ типа « m » от частоты при различных m

Вид АЧХ фильтра типа « m » (см. рис. 3.5) зависит от значения коэффициента m . Чем меньше значение m , тем круче нарастает кривая затухания вблизи границы раздела полосы прозрачности и полосы затухания, но тем меньше затухание на частотах выше ω_∞ и тем быстрее уменьшается затухание на частотах выше ω_∞ . Следовательно, на частотах, близких к $\omega_{гр}$, затухание фильтра типа « m » больше затухания фильтра типа « k », а на частотах, значительно больших $\omega_{гр}$ — наоборот. Поэтому в реальных фильтрах звенья типа « k » соединяют каскадно со звеньями типа « m », что обеспечивает более

равномерную частотную характеристику всего фильтра в целом (см. рис. 3.6).

При каскадном согласованном включении фильтров типа « k » и типа « m » их недостатки взаимно компенсируются, и полученный комбинированный фильтр имеет АЧХ более приближенную к идеальной (см. рис. 3.6).

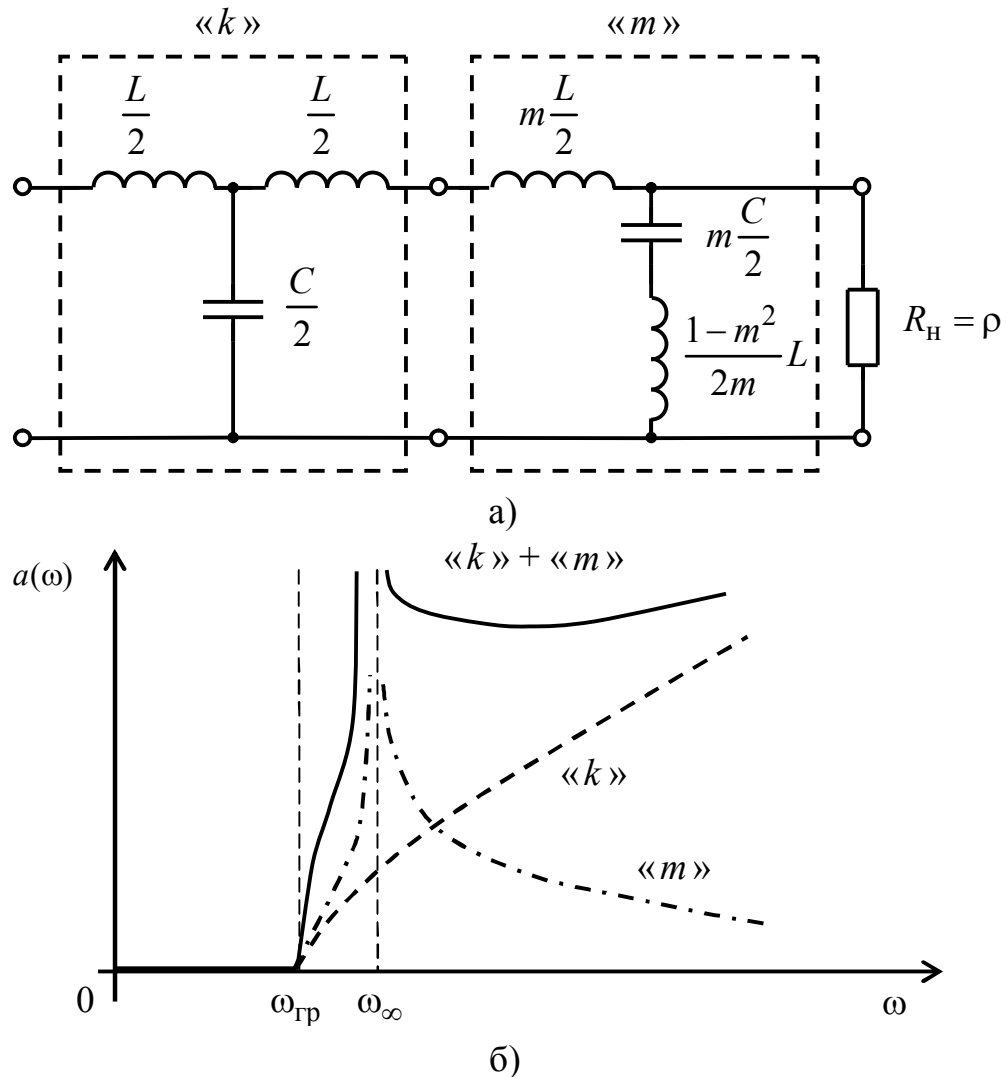


Рис. 3.6 — Комбинированный фильтр из звеньев типа « k » и типа « m »: (а) схема комбинированного фильтра (б) АЧХ комбинированного фильтра, полученная путем сложения АЧХ фильтров типа « k » и типа « m »

К достоинствам фильтров типа « m » следует отнести следующее:

- более резкое изменение затухания на границе полосы пропускания и полосы затухания, чем у фильтров типа « k »;
- слабая зависимость от частоты характеристических сопротивлений фильтров в полосе пропускания, что позволяет лучше согласовать фильтр типа « m » с нагрузкой.

Недостатками фильтров типа « m » являются:

- сильная неравномерность затухания в полосе задерживания;
- уменьшение затухания по мере удаления частоты внешнего воздействия от $\omega_{гр}$ в полосе затухания.

3.3. Предварительный расчет

3.3.1. Рассчитать граничные частоты $\omega_{гр}(f_{гр})$ Г-образного звена последовательно-производного ФНЧ, если значения элементов схемы фильтра прототипа составляют: $L_1 = L/2 = 130$ мкГ; $C_1 = C/2 = 0,05$ мкФ.

3.3.2. Рассчитать граничные частоты $\omega_{гр}$ и $f_{гр}$ Г-образного звена параллельно-производного ФВЧ, если значения элементов схемы фильтра прототипа составляют: $L_2 = 2L = 130$ мкГ; $C_2 = 2C = 0,05$ мкФ.

3.3.3. Рассчитать параметры элементов указанных фильтров типа « m » для $m=0,6$.

3.3.4. Рассчитать сопротивление нагрузки $R_H = \rho$ фильтров типа « m ».

3.3.5. Рассчитать частоту бесконечного затухания ω_∞ указанных фильтров типа « m ».

3.4. Описание лабораторного макета

Лабораторная работа №9 выполняется на том же макете, что и предыдущая работа. Внешний вид лабораторного макета с органами управления для исследования характеристик фильтров типа « m » показан на рис. 1.11.

3.5. Порядок выполнения работы

3.5.1. Измерение АЧХ последовательно-производного ФНЧ типа « m » при нагрузке $R_H = \rho$

3.5.1.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г7. Тумблер S_2 перевести в положение «1», а переключатель S_5 — в положение «3». Переключатель «Нагрузка R_H » перевести в положение « ρ ».

3.5.1.2. Установить на входе фильтра (гнездо Г8) действующее значение напряжения, равное $U_{вх} = 1$ В, на частоте $0,1f_{гр}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

3.5.1.3. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{гр}$ до $2f_{гр}$ с шагом $0,1f_{гр}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г8 и Г9. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

3.5.2. Измерение АЧХ Г-образного звена ФНЧ типа « k » при нагрузке $R_H = \rho$

3.5.2.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г1.

3.5.2.2. Установить тумблеры S_1 и S_2 в положение «1», а переключатель S_5 — в положение «1».

3.5.2.3. Установить на входе фильтра (гнездо Г1) действующее значение напряжения, равное $U_{вх} = 1$ В, на частоте $0,1f_{гр}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

3.5.2.4. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты.

ты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{гр}$ до $2f_{гр}$ с шагом $0,1f_{гр}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г1 и Г3. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Результаты измерений

Частота f , Гц	$U_{вых}$, В				
	ФНЧ при $R_H = \rho$			ФВЧ при $R_H = \rho$	
	типа « m »	типа « k »	комбин.	типа « m »	комбин.
$0,1f_{гр}$					
$0,2f_{гр}$					
...					
$2f_{гр}$					

3.5.3. Измерение АЧХ комбинированного ФНЧ при нагрузке $R_H = \rho$

3.5.3.1. Установить тумблеры $S1$ и $S2$ в положение «2», а переключатель $S5$ — в положение «3».

3.5.3.2. Установить переключатель «Нагрузка R_H » в положение « ρ ».

3.5.3.3. Установить на входе фильтра (гнездо Г1) действующее значение напряжения, равное $U_{вх} = 1$ В, на частоте $0,1f_{гр}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

3.5.3.4. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{гр}$ до $2f_{гр}$ с шагом $0,1f_{гр}$, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г1 и Г9. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

3.5.4. Измерение АЧХ параллельно-производного ФВЧ типа « m » при нагрузке $R_H = \rho$

3.5.4.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г17.

3.5.4.2. Установить тумблер $S4$ в положение «1», а переключатель $S5$ — в положение «6».

3.5.4.3. Установить переключатель «Нагрузка R_H » в положение « ρ ».

3.5.4.4. Установить на входе фильтра (гнездо Г17) действующее значение напряжения, равное $U_{вх} = 1$ В, на частоте $0,1f_{гр}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

3.5.4.5. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{гр}$ до $2f_{гр}$ с шагом, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г18 и Г19. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

3.5.5. Измерение АЧХ комбинированного ФВЧ при нагрузке $R_H = \rho$

3.5.5.1. Подключить выход генератора НЧ к гнезду Г10.

3.5.5.2. Установить тумблера $S3$ и $S4$ в положение «2», а переключатель $S5$ — в положение «6».

3.5.5.3. Установить переключатель «Нагрузка R_n » в положение «р».

3.5.5.4. Установить на входе фильтра (гнездо Г10) действующее значение напряжения, равное $U_{вх} = 1 \text{ В}$, на частоте $0,1f_{гр}$. Это значение необходимо поддерживать **постоянным** в процессе проведения всех последующих измерений.

3.5.5.5. Измерить зависимость выходного напряжения фильтра от частоты, изменяя частоту генератора от $0,1f_{гр}$ до $2f_{гр}$ с шагом, подключая вольтметр поочередно к гнездам Г11 и Г19. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

3.6. Обработка результатов измерений

3.6.1. Рассчитать коэффициент передачи $K(f)$ на всех частотах и для всех разновидностей исследованных схем, по экспериментальным данным из таблицы 3.1. Результаты расчетов занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 — Экспериментальные АЧХ фильтра

Частота f , Гц	Эксперимент	
	$K(f)$	$a(f)$, дБ
$0,1f_{гр}$		
$0,2f_{гр}$		
...		
$2f_{гр}$		

3.6.2. Построить зависимости $K(f)$ и $a(f)$ на отдельных графиках для ФНЧ и ФВЧ, соблюдая один масштаб по оси частот для всех кривых.

3.7. Оформление отчета

3.7.1. Сформулировать цель работы.

3.7.2. Привести схему лабораторной установки.

3.7.3. Привести результаты предварительного расчета.

3.7.4. Привести таблицы с экспериментальными данными и графики полученных зависимостей.

3.8. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее.

3.8.1. Сравнить результаты расчетов и эксперимента.

3.8.2. Указать, какая экспериментальная амплитудно-частотная характеристика фильтра наиболее близка к теоретической.

3.9. Контрольные вопросы

3.9.1. Какие фильтры называются фильтрами типа « m »? Привести примеры. В каких пределах может изменяться значение параметра « m »: а) теоретические, б) практические.

3.9.2. Как рассчитать частоту бесконечного затухания фильтров типа « m ».

3.9.3. Изобразите зависимости $a(\omega)$, $|Z_{tm}(\omega)|$, $|Z_{pm}(\omega)|$ для ФНЧ для различных значений « m ».

3.9.4. Каковы достоинства и недостатки фильтров типа « m »?

3.9.5. При каком коэффициенте « m » АЧХ фильтра равномерна в полосе пропускания?

3.9.6. Изобразить схемы последовательно-производного и параллельно-производного звеньев типа « m » ФНЧ и ФВЧ. Рассчитать все элементы звеньев при условии совпадения граничных частот с фильтром прототипом типа « k ».

3.9.7. Объяснить, почему фильтры типа « m » чаще всего применяются в сочетании с фильтрами типа « k ». Изобразить качественно АЧХ комбинированного фильтра нижних частот, состоящего из звеньев типа « k » и « m ».

3.9.8. С какого входа Г-образного звена фильтра типа « m » производится соединение его с фильтром типа « k »? Изобразить схему комбинированного фильтра верхних частот, состоящего из Г-образных звеньев типа « k » и типа « m ».

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

4.1. Цель работы

Исследования переходных процессов в цепях первого порядка при подключении и отключении цепи от источника постоянного напряжения и источника с гармонической ЭДС.

4.2. Теоретические сведения

4.2.1. Общие сведения

Любое скачкообразное изменение, как топологии, так и параметров элементов электрической цепи приводит к нарушению установившегося режима и называется *коммутацией*. После коммутации с течением времени цепь переходит в новый установившийся режим. Неустановившиеся или нестационарные процессы, которые имеют место при переходе цепи из одного установившегося режима к другому, называются *переходными процессами*.

Переходные процессы возникают после проведенных в цепи коммутаций. Возникновение переходных процессов связано с наличием реактивных элементов наряду с резистивными.

Энергия электрического поля W_C накопления в емкости C равна

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}, \quad (4.1)$$

а энергия магнитного поля W_L накопления в индуктивности L равна

$$W_L = \frac{Li_L^2}{2}, \quad (4.2)$$

где u_C — напряжение на емкости; i_L — ток индуктивности.

Покажем, что энергия, накопленная в реактивных элементах, не может изменяться мгновенно. Изменение энергии за единицу времени представляет собой мощность: $P = dW/dt$. Если допустить, что энергия W изменится мгновенно скачком, то мощность должна стремиться к бесконечности $P \rightarrow \infty$. Последний вывод не имеет смысла, так как не реализуем на практике.

Поскольку энергия в реактивных элементах не может измениться скачком, следовательно, ток индуктивности i_L и напряжение на емкости u_C являются непрерывными функциями времени.

При анализе переходных процессов принято считать, что коммутация выполняется мгновенно. Как правило, момент коммутации является началом

отсчета времени переходного процесса $t = 0$. Момент времени, непосредственно предшествующий коммутации обозначают через $t = 0_-$, а момент времени, непосредственно следующий за коммутацией — $t = 0_+$.

Первый закон коммутации: в начальный момент времени после коммутации ток индуктивности сохраняет такое же значение, как и непосредственно перед коммутацией

$$i_L(0_+) = i_L(0_-), \quad (4.3)$$

то есть индуктивность представляет собой в момент коммутации разрыв цепи при нулевых начальных условиях и источник тока при ненулевых начальных условиях.

Второй закон коммутации: в начальный момент времени после коммутации напряжение емкости сохраняет такое же значение, как и непосредственно перед коммутацией

$$u_C(0_+) = u_C(0_-), \quad (4.4)$$

то есть емкость представляет собой в момент коммутации короткое замыкание цепи при нулевых начальных условиях и источник ЭДС при ненулевых начальных условиях.

Расчет переходного процесса основан на решении дифференциального уравнения, составленного из системы уравнений электрического равновесия цепи относительно тока или напряжения интересующей ветви. Данное уравнение может быть решено классическим или операторным методами, а также с помощью интеграла Дюамеля (наложения).

Совокупность начальных значений токов независимо включенных индуктивностей и напряжений независимо включенных емкостей в момент времени $t = 0_-$ представляют собой *независимые начальные условия*. Используя независимые начальные условия, определяют значения токов, напряжений и их производных в момент времени $t = 0_+$, являющиеся *зависимыми начальными условиями*.

Решение дифференциального уравнения относительно величины y классическим методом представляет собой сумму свободной $y_{св}$ и вынужденной $y_{вын}$ составляющих

$$y = y_{св} + y_{вын}. \quad (4.5)$$

Свободная составляющая $y_{св}$ является общим решением однородного дифференциального уравнения и описывает процессы в цепи без источников внешнего воздействия. Поэтому характер свободной составляющей не зависит от вида внешнего воздействия, а определяется только параметрами и топологией электрической цепи после коммутации.

Вынужденная составляющая $y_{вын}$ является частным решением неоднородного дифференциального уравнения и определяется действующими в цепи независимыми источниками энергии. В цепях с потерями свободная составляющая $y_{св}$ с течением времени становится равной нулю. Поэтому вынужденная составляющая $y_{вын}$ определяет режим цепи в установившемся состоя-

нии. Для расчета $u_{\text{вын}}$ можно использовать любой известный метод анализа цепи в установившемся режиме.

Алгоритм применения классического метода анализа переходных процессов состоит из следующих этапов:

- анализ цепи до коммутации, определение токов индуктивностей и напряжений емкостей в момент времени $t = 0_-$ и определение независимых начальных условий с использованием законов коммутации (4.3) и (4.4);
- составление дифференциального уравнения цепи *после коммутации*;
- анализ установившегося процесса в цепи после коммутации и определение $u_{\text{вын}}$;
- определение свободной составляющей решения $u_{\text{св}}$;
- нахождение общего вида решения как суммы свободной и вынужденной составляющих;
- определение зависимых начальных условий и постоянных интегрирования;

4.2.2. Переходной процесс в последовательной RC -цепи при подключении источника постоянного напряжения E

Схема подключения последовательной RC -цепи к источнику постоянного напряжения E изображена на рис. 4.1. До момента коммутации ключ S находится в положении 1.

В момент времени $t = 0_-$, непосредственно предшествующей коммутации, цепь находится в установившемся режиме при нулевых начальных условиях, то есть напряжение на емкости равно нулю: $u_C(0_-) = 0$.

Согласно второму закону коммутации (4.4) находим независимые начальные условия

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0. \quad (4.6)$$

В момент времени $t = 0$ в рассматриваемой цепи происходит переключение ключа S из положения 1 в положение 2. Система уравнений электрического равновесия после коммутации представляется следующим выражением:

$$\begin{cases} u_R + u_C = E; \\ i_C = i_R = i; \\ i_C = C \frac{du_C}{dt}; \\ i_R = \frac{u_R}{R}. \end{cases} \quad (4.7)$$

Используя (4.7), составим дифференциальное уравнение относительно напряжения на емкости u_C

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (4.8)$$

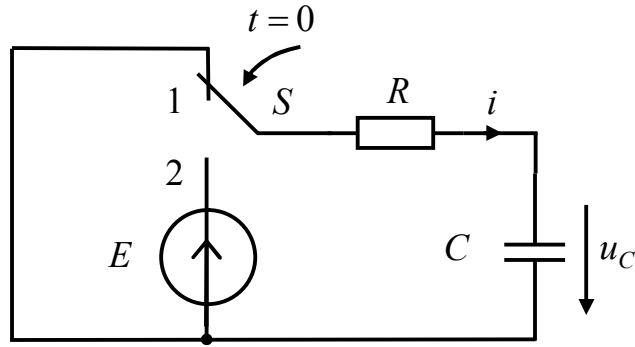


Рис. 4.1 — Схема подключения последовательной RC -цепи к источнику постоянного напряжения E

После коммутации ключа S через некоторое время, когда переходной процесс закончится, в цепи установится режим постоянного тока. При этом ток, протекающий в цепи, равен нулю, а напряжение на емкости — E , то есть вынужденная составляющая напряжения на емкости равна

$$u_{C\text{вын}} = E. \quad (4.9)$$

Свободная составляющая напряжения на емкости u_C определяется решением однородного дифференциального уравнения первого порядка

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0, \quad (4.10)$$

которому соответствует характеристическое уравнение

$$RCp + 1 = 0. \quad (4.11)$$

Из (4.11) определим корень характеристического уравнения

$$p = -1/RC = -1/\tau_{RC}, \quad (4.12)$$

где $\tau_{RC} = RC$ — постоянная времени RC -цепи.

С учетом (4.12) находим свободную составляющую $u_{C\text{св}}$

$$u_{C\text{св}} = A e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}. \quad (4.13)$$

Используя (4.12), (4.13) и (4.5), определяем u_C после коммутации

$$u_C = E + A e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}. \quad (4.14)$$

Определим постоянную интегрирования A с учетом независимых начальных условий (4.6). Подставив (4.6) в (4.14), находим $A = -E$. С учетом этого соотношение (4.14) примет вид

$$u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}). \quad (4.15)$$

Воспользовавшись системой уравнений (4.7), находим ток i и напряжение на сопротивлении R после коммутации

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}; \quad u_R = E e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}. \quad (4.16)$$

На рис. 4.2 показаны временные зависимости напряжений на элементах и тока в последовательной RC -цепи при переходном процессе, вызванном подключением к цепи источника постоянного напряжения.

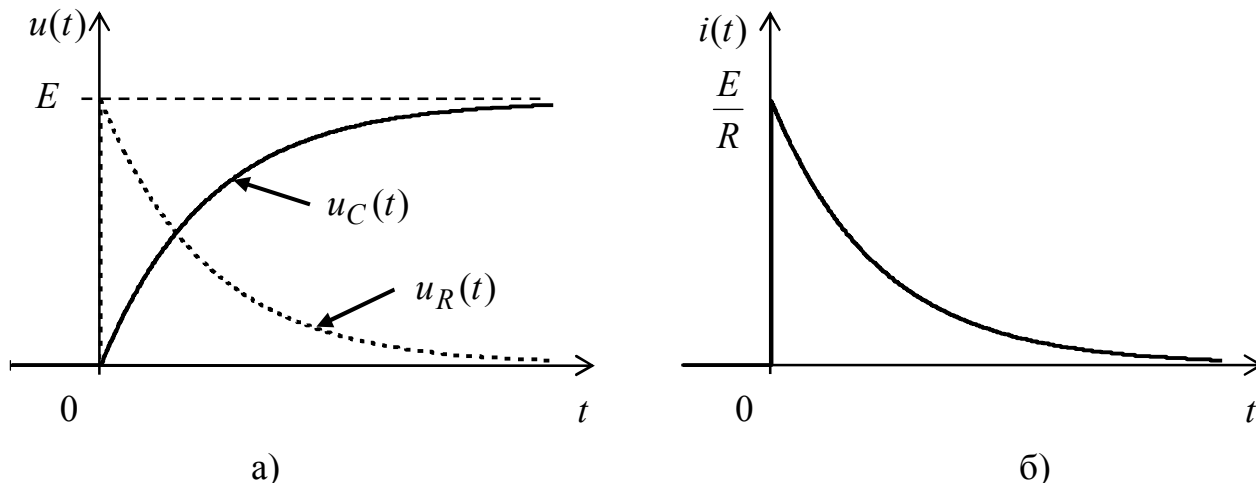


Рис. 4.2 — Временные зависимости напряжения на емкости $u_C(t)$ (а), на сопротивлении $u_R(t)$ (а) и тока цепи $i(t)$ (б) при подключении RC -цепи к источнику постоянного напряжения

4.2.3. Переходной процесс в последовательной RC -цепи при отключении от источника постоянного напряжения E

Схема последовательной RC -цепи при отключении источника постоянного напряжения E показана на рис. 4.3. До момента коммутации ключ S находится в положении 1.

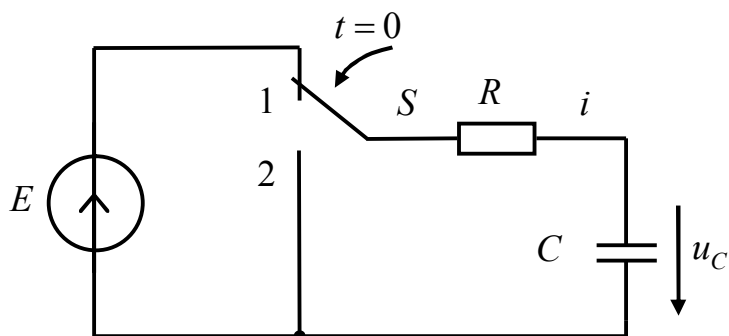


Рис. 4.3 — Схема отключения последовательной RC -цепи от источника постоянного напряжения

Напряжение на емкости равно E , а ток, протекающий в цепи, равен нулю, поскольку емкость в установившемся режиме для постоянного тока имеет бесконечно большое сопротивление. Согласно второму закону коммутации (4.4) находим независимые начальные условия

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = E. \quad (4.17)$$

В момент времени $t = 0$ в рассматриваемой цепи происходит переключение ключа S из положения 1 в положение 2. Система уравнений электрического равновесия после коммутации аналогична (4.7), за исключением первого уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа [2]

$$u_R + u_C = 0. \quad (4.18)$$

Используя (4.7) с учетом (4.18), составляем дифференциальное уравнение

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0. \quad (4.19)$$

Вынужденная составляющая $u_{C_{\text{вын}}}$ равна нулю, а свободная составляющая $u_{C_{\text{св}}}$ определяется уравнением (4.13). Тогда с учетом (4.5) решение дифференциального уравнения (4.19) принимает вид

$$u_C = A e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}. \quad (4.20)$$

Используя начальные условия (4.17), находим постоянную интегрирования, которая равна $A = E$. Тогда напряжение на емкости u_C определяется выражением

$$u_C = E e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}, \quad (4.21)$$

а ток в цепи и напряжение на сопротивлении

$$i = i_C = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}, \quad u_R = -E e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}. \quad (4.22)$$

На рис. 4.4 показаны временные зависимости напряжений и тока в последовательной RC -цепи при переходном процессе, вызванном отключением от цепи источника постоянного напряжения.

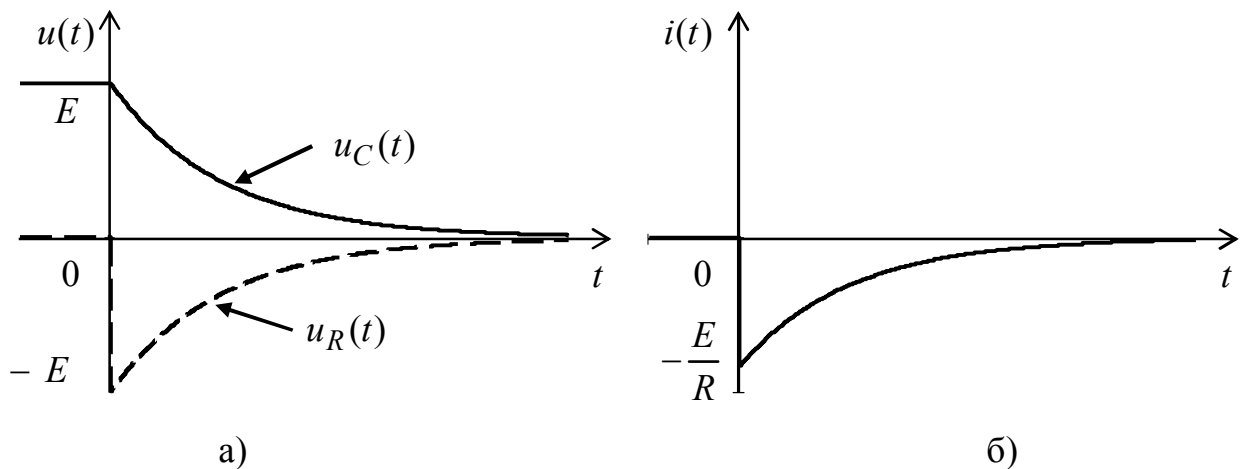


Рис. 4.4 — Временные зависимости напряжения на емкости $u_C(t)$ (а), напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ и тока цепи $i(t)$ (б) в RC -цепи при отключении от источника постоянного напряжения

4.2.4. Переходной процесс в последовательной RL -цепи при подключении к источнику постоянного напряжения E

Схема подключения последовательной RL -цепи к источнику постоянного напряжения E изображена рис. 4.5.

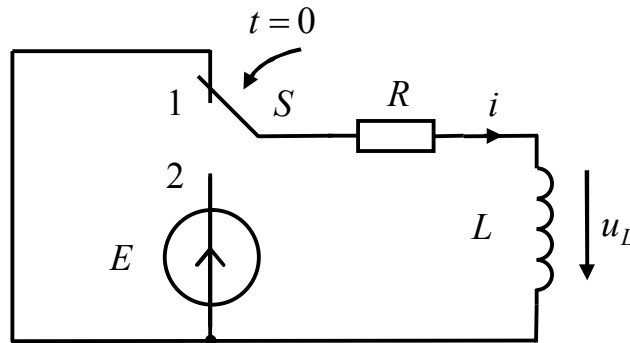


Рис. 4.5 — Схема подключения последовательной RL -цепи к источнику постоянного напряжения

В момент времени $t = 0_-$, непосредственно предшествующей коммутации, цепь находится в установившемся состоянии. При этом в схеме отсутствуют источники энергии. Поэтому ток, протекающий в цепи, равен нулю и напряжения на сопротивлении и индуктивности также равны нулю. Согласно первому закону коммутации (4.3), определяем независимые начальные условия

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0. \quad (4.23)$$

Система электрического равновесия цепи после коммутации

$$\begin{cases} u_R + u_L = E; \\ i_L = i_R = i; \\ u_L = L \frac{di_L}{dt}; \\ i_R = u_R / R. \end{cases} \quad (4.24)$$

Используя (4.24), составим дифференциальное уравнение относительно тока индуктивности i_L

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L = E. \quad (4.25)$$

Вынужденная $i_{L_{\text{вын}}}$ и свободная $i_{L_{\text{св}}}$ составляющие решения уравнения (4.25) равны

$$i_{L_{\text{вын}}} = E / R, \quad (4.26)$$

$$i_{L_{\text{св}}} = A e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}, \quad (4.27)$$

где $\tau_{RL} = L / R$ — постоянная времени RL -цепи.

Используя (4.26) и (4.27), с учетом (4.5) решение дифференциального уравнения, запишем в виде

$$i_L = A e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}} + \frac{E}{R}. \quad (4.28)$$

Используя независимые начальные условия (4.23), определяем постоянную интегрирования $A = -E/R$. С учетом этого, уравнение (4.28) примет вид

$$i_L = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}). \quad (4.29)$$

С учетом (4.29) и (4.24), находим u_L и u_R

$$u_L = E e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}; \quad u_R = E (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}). \quad (4.30)$$

На рис. 4.6 показаны зависимости тока $i_L(t)$ и напряжения $u_L(t)$ при подключении к источнику постоянного напряжения.

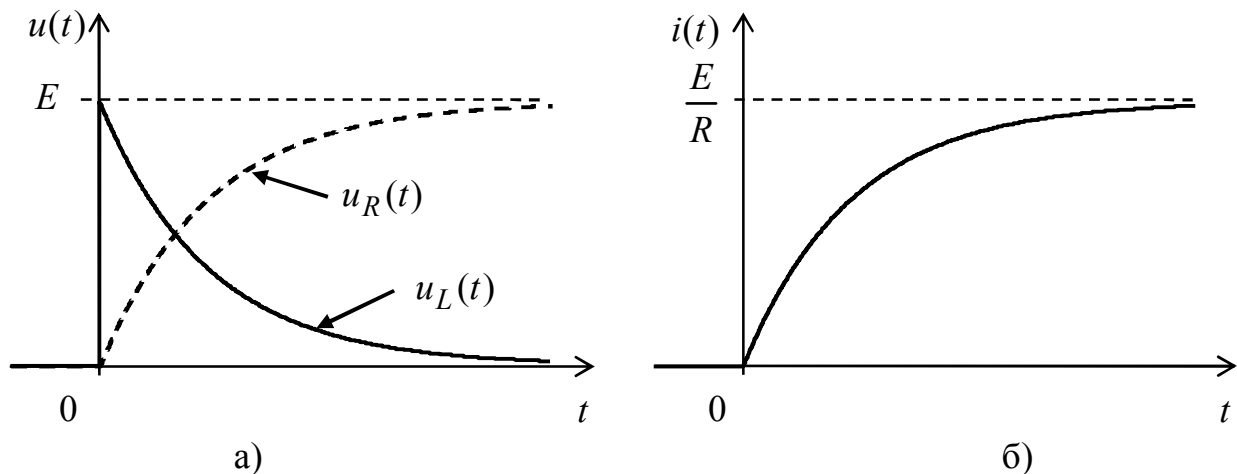


Рис. 4.6 — Временные зависимости напряжения на индуктивности $u_L(t)$ (а), напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ (а) и тока цепи $i(t)$ (б) при подключении RL -цепи к источнику постоянного напряжения

4.2.5. Переходной процесс в последовательной RL -цепи при отключении от источника постоянного напряжения E

Схема отключения последовательной RL -цепи от источника постоянного напряжения E изображена на рис. 4.7.

В момент времени $t = 0_-$ цепь находится в установившемся состоянии с единственным источником энергии. При этом ток, протекающий в цепи, равен E/R , а напряжение на индуктивности — нулю, поскольку сопротивление индуктивности для постоянного тока имеет бесконечно малое сопротивление. Согласно первому закону коммутации (4.3) находим независимые начальные условия

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = E/R. \quad (4.31)$$

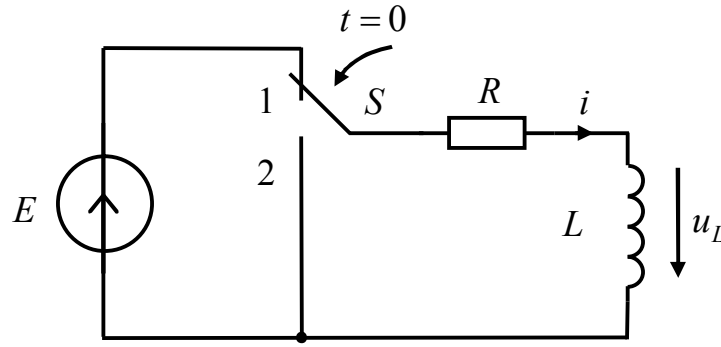


Рис. 4.7 — Схема отключения последовательной RL -цепи от источника постоянного напряжения

В момент времени $t = 0$ в рассматриваемой цепи происходит переключение ключа S из положения 1 в положение 2. Система уравнений электрического равновесия после коммутации аналогична (4.24), за исключением первого уравнения, которое имеет вид

$$u_R + u_L = 0. \quad (4.32)$$

Используя (4.24) с учетом (4.32), составляем дифференциальное уравнение

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L = 0. \quad (4.33)$$

Вынужденная составляющая $i_{L\text{вын}}$ равна нулю, а свободная составляющая $i_{L\text{св}}$ определяется уравнением (4.27). Тогда решение имеет вид

$$i_L = A e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}. \quad (4.34)$$

Используя начальные условия (4.31) и соотношения (4.34), находим постоянную интегрирования $A = E/R$. Тогда токи цепи i и индуктивности i_L , напряжения u_L и u_R определяются следующим образом

$$i = i_L = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}; \quad u_L = -E e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}; \quad u_R = E e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}.$$

На рис. 4.8 показаны временные зависимости тока цепи $i(t)$ и напряжения на индуктивности $u_L(t)$ при отключении от источника постоянного напряжения.

4.2.6. Переходной процесс в последовательной RC -цепи при подключении к источнику гармонической ЭДС

Внешнее воздействие на цепь (см. рис. 4.1) в этом случае описывается следующим выражением

$$e(t) = E_m \cos(\omega_1 t + \psi_1) l(t), \quad (4.35)$$

где E_m — амплитуда гармонического колебания; ω_1 — круговая частота колебания; ψ_1 — начальная фаза колебания; $1(t)$ — функция Хевисайда.

График внешнего воздействия (4.35) показан на рис. 4.9.

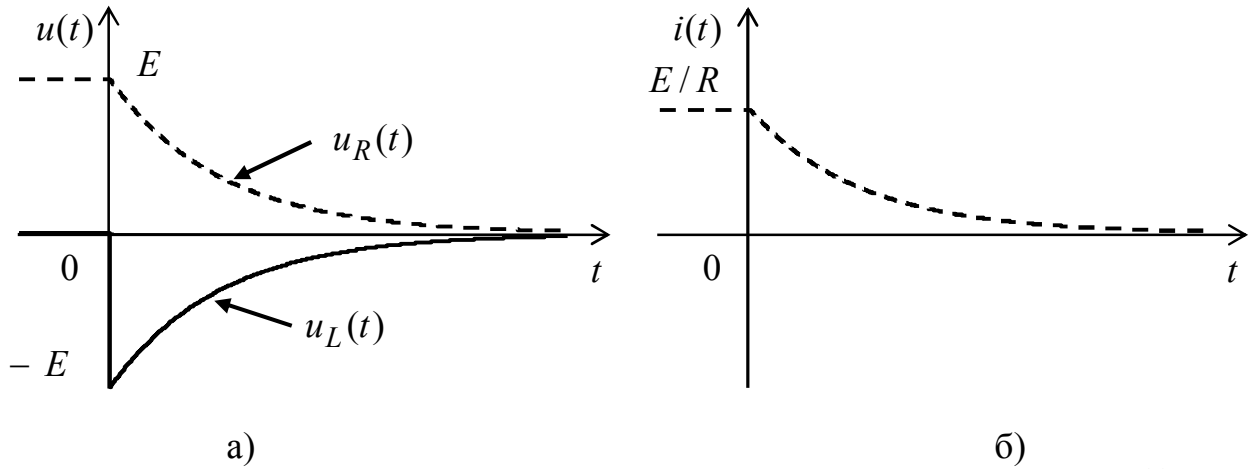


Рис. 4.8 — Временные зависимости напряжения на индуктивности $u_L(t)$ (а), напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ (а) и тока цепи $i(t)$ (б) в RL -цепи при отключении от источника постоянного напряжения

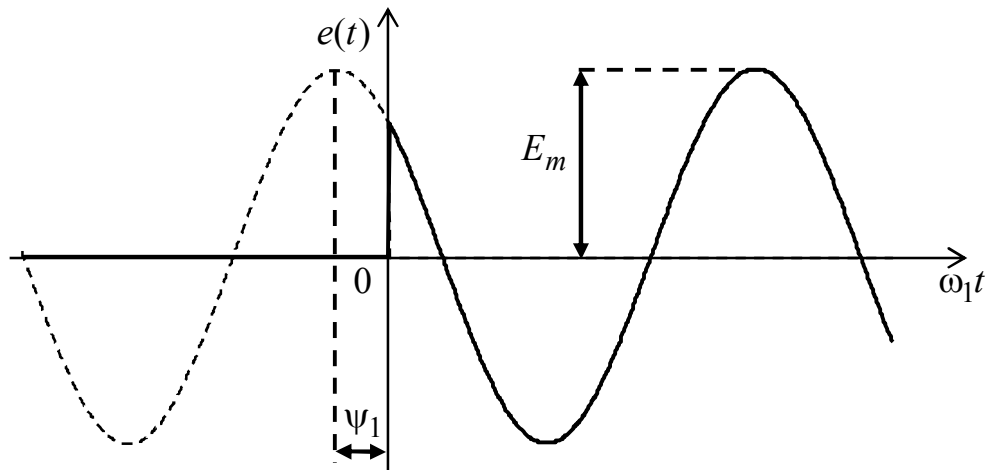


Рис. 4.9 — График гармонического внешнего воздействия

До коммутации в цепи отсутствуют источники энергии, поэтому, на основании второго закона коммутации (4.4), начальные условия определяются равенством (4.6). Дифференциальное уравнение цепи после коммутации $t > 0$ относительно напряжения на емкости u_C имеет вид

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E_m \cos(\omega_1 t + \psi_1). \quad (4.36)$$

С помощью метода комплексных амплитуд находим вынужденную составляющую $u_{C_{\text{вын}}}$:

$$u_{C_{\text{вын}}} = \frac{E_m}{Z_{RC} \omega_1 C} \cos(\omega_1 t + \psi_1 - \varphi_{RC} - \frac{\pi}{2}), \quad (4.37)$$

где Z_{RC} и φ_{RC} — модуль и аргумент входного сопротивления RC -цепи соответственно; $Z_{RC} = \sqrt{R^2 + (1/\omega_1 C)^2}$; $\varphi_{RC} = -\arctg(1/(\omega_1 RC))$.

Свободная составляющая решения уравнения (4.36) определяется (4.13). С учетом (4.13) и (4.4) напряжение на емкости u_C запишем в виде

$$u_C = \frac{E_m}{Z_{RC}\omega_1 C} \cos(\omega_1 t + \psi_1 - \varphi_{RC} - \frac{\pi}{2}) + A e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}, \quad (4.38)$$

где A — постоянная интегрирования.

Воспользовавшись начальными условиями (4.6), находим A

$$A = \frac{E_m}{Z_{RC}\omega_1 C} \cos(\psi_1 - \varphi_{RC} - \frac{\pi}{2}). \quad (4.39)$$

С учетом (4.31), находим напряжение на емкости u_C после коммутации

$$u_C = \frac{E_m}{Z_{RC}\omega_1 C} \cos(\omega_1 t + \psi_1 - \varphi_{RC} - \frac{\pi}{2}) - \frac{E_m}{Z_{RC}\omega_1 C} \cos(\psi_1 - \varphi_{RC} - \frac{\pi}{2}) e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}. \quad (4.40)$$

На рис. 4.9 показана зависимость напряжения на емкости $u_C(t)$ от времени при подключении к источнику гармонического напряжения.

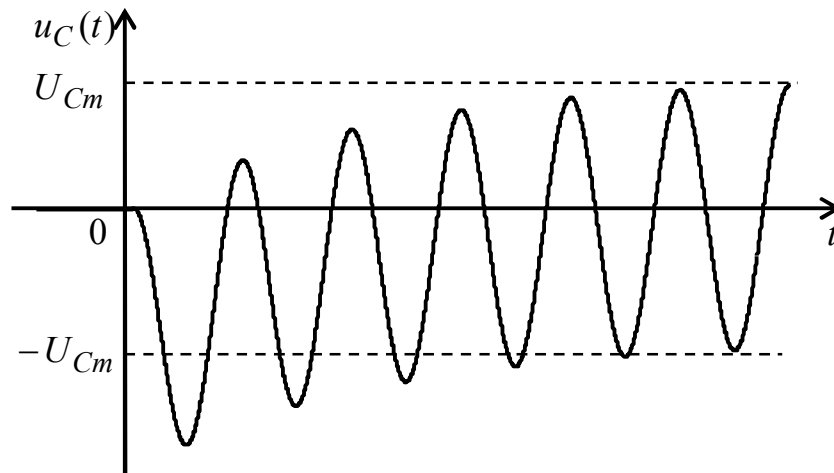


Рис. 4.10 — Временная зависимость напряжения $u_C(t)$ на емкости в RC -цепи при подключении к источнику гармонической ЭДС

4.2.7. Переходной процесс в последовательной RL -цепи при подключении к источнику гармонической ЭДС

Рассмотрим переходной процесс в последовательной RL -цепи (рис. 4.5.) при подключении источника гармонической ЭДС (4.35). Определим ток индуктивности после коммутации. До коммутации в цепи отсутствовали источники энергии, поэтому, на основании первого закона коммутации, начальные условия определяются равенством (4.23). Дифференциальное уравнение цепи после коммутации относительно тока индуктивности i_L имеет следующий вид

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L = E_m \cos(\omega_1 t + \psi_1). \quad (4.41)$$

Используя метод комплексных амплитуд, определяем вынужденную составляющую тока $i_{L\text{вын}}$

$$i_{L\text{вын}} = \frac{E_m}{Z_{RL}} \cos(\omega_1 t + \psi_1 - \varphi_{RL}), \quad (4.42)$$

где Z_{RL} и φ_{RL} — модуль и аргумент входного сопротивления цепи соответственно; $Z_{RL} = \sqrt{R^2 + (\omega_1 L)^2}$; $\varphi_{RL} = \arctg(\omega_1 L / R)$.

Свободная составляющая определяется отношением (4.29). С учетом (4.23) и (4.29) находим ток индуктивности

$$i_L = \frac{E_m}{Z_{RL}} \cos(\omega_1 t + \psi_1 - \varphi_{RL}) - \frac{E_m}{Z_{RL}} \cos(\psi_1 - \varphi_{RL}) e^{-\frac{t}{\tau_{RL}}}.$$

На рис. 4.11 показана временная зависимость тока индуктивности $i_L(t)$ при подключении RL -цепи к источнику гармонического напряжения.

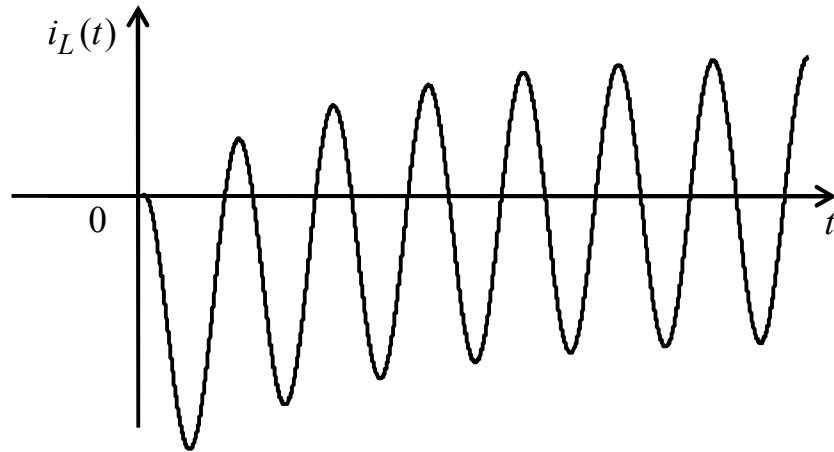


Рис. 4.11 — Временная зависимость тока индуктивности $i_L(t)$ при подключении RL -цепи к источнику гармонической ЭДС

На практике принято считать длительность переходного процесса равной 3τ : за это время напряжение на емкости или ток индуктивности достигает уровня 0,95 от установившегося значения. Поэтому для RC и RL -цепей длительность переходного процесса составит:

$$t_{\text{уст}} = 3\tau_{RC} = 3RC; \quad (4.43)$$

$$t_{\text{уст}} = 3\tau_{RL} = \frac{3L}{R}. \quad (4.44)$$

4.3. Предварительный расчет

4.3.1. Рассчитать постоянную времени τ_{RC} и длительность переходного процесса $t_{уст}$ для последовательной RC -цепи при следующих параметрах электрической цепи: а) $R=2,5$ кОм, $C=6200$ пФ; б) $R=14$ кОм, $C=6200$ пФ.

4.3.2. Рассчитать постоянную времени τ_{RL} и длительность переходного процесса $t_{уст}$ для последовательной RL -цепи при следующих параметрах электрической цепи: а) $R=0,7$ кОм, $L=33$ мГн; б) $R=2,5$ кОм, $L=33$ мГн.

4.3.3. Рассчитать и построить графики переходного процесса в последовательных RC и RL -цепях с параметрами элементов, приведенных в п. 4.3.1 и 4.3.2 при включении и выключении источника постоянного напряжения $E=1,5$ В.

4.3.4. Рассчитать начальные фазы гармонического внешнего воздействия на последовательные RC и RL -цепи, при которых переходной процесс будет отсутствовать. Цепи имеют следующие элементы: $R=2,5$ кОм; $L=33$ мГн; $C=0,047$ мкФ; $f=10$ кГц.

4.4. Описание лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки для исследования переходных процессов в цепях первого и второго порядков показана на рис. 4.12.

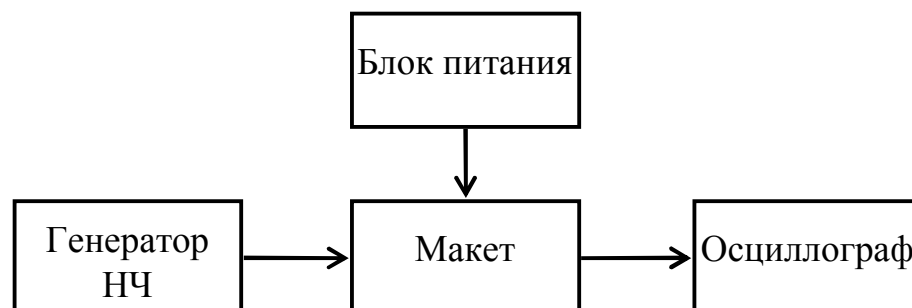


Рис. 4.12 — Функциональная схема лабораторной установки для исследования переходных процессов в цепях первого и второго порядков

Лабораторная установка состоит из макета, блока питания, генератора НЧ и осциллографа.

Внешний вид лабораторного макета показан на рис. 4.13. Макет состоит из регулируемого фазовращателя ФВ, электронного ключа К, схемы управления СУ и набора исследуемых линейных электрических цепей. На вход макета подается гармоническое напряжение от генератора НЧ, которое преобразуется схемой управления в последовательность прямоугольных импульсов с периодом следования, значительно превышающим длительность переходных процессов. Эта последовательность импульсов является управляющим сигналом электронного ключа, который включается только на время, равное длительности импульса, составляющую половину периода следования импульсов. Переключатель $S1$ через электронный ключ К соединяет исследуемую цепь с источником постоянного напряжения $E_1=1,5$ В (положение 1) или гармонической ЭДС (4.35) (положение 2).

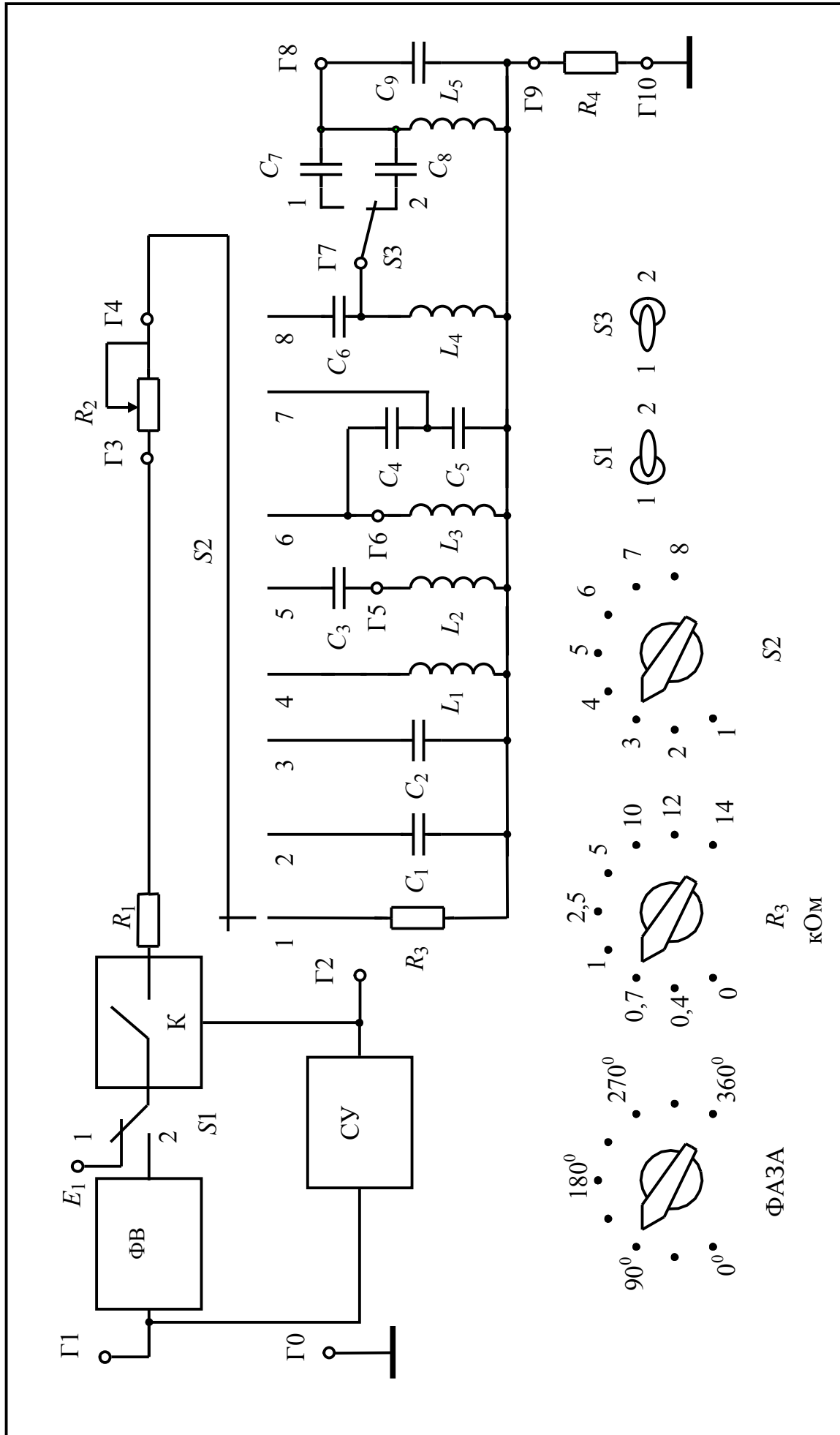


Рис. 4.13 — Внешний вид лабораторного макета для исследования переходных процессов в цепях первого и второго порядка

Начальная фаза ψ_1 гармонической ЭДС может изменяться с помощью фазовращателя в пределах от 0° до 360° с шагом 45° . Поскольку период прямоугольных импульсов управления значительно больше длительности переходного процесса, то цепь перед очередной коммутации находится в установившемся режиме.

Для наблюдения и измерения параметров переходного процесса используется осциллограф, развертка которого синхронизируется с положительными или отрицательными фронтами прямоугольных импульсов (гнездо Г2). Выбор исследуемой цепи, подключаемой к выходу ключа, осуществляется переключателем $S2$. Величина постоянной времени цепи задается сопротивлением R_2 . Форма напряжения на резисторе R_4 с величиной сопротивления 60 Ом повторяет форму тока переходного процесса в цепи.

4.5. Порядок выполнения работы

4.5.1. Подготовка к работе

4.5.1.1. Подключить лабораторный макет к блоку питания.

4.5.1.2. Включить блок питания, генератор НЧ и осциллограф.

4.5.1.3. Выход генератора НЧ подключить к гнезду Г1, а вход внешней синхронизации осциллографа (вход «Х») — к гнезду Г2.

4.5.1.4. Переключатель $S1$ на панели макета перевести в положение «1».

4.5.1.5. Установить на выходе генератора гармоническое напряжение амплитудой 5 В и частотой 10 кГц.

4.5.1.6. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации положительными импульсами.

4.5.2. Исследование переходного процесса в резистивной цепи

4.5.2.1. Установить переключатель $S2$ в положение «1».

4.5.2.2. Зарисовать осциллограммы напряжений входного $u_{\text{вх}}(t)$ (гнездо Г3), выходного $u_{\text{вых}}(t)$ (гнездо Г4), и на сопротивлении R_4 $u_{R_2}(t)$ (гнездо Г4) для двух значений сопротивления R_2 : 1 кОм и 14 кОм.

4.5.3. Исследование переходного процесса в RC-цепи при подключении к источнику постоянного напряжения E_1

4.5.3.1. Установить переключатель $S2$ в положение «2».

4.5.3.2. Наблюдать осциллограммы напряжений на емкости $u_{C_1}(t)$ (гнездо Г4) и сопротивлении R_4 $u_{R_4}(t)$ (гнездо Г9).

4.5.3.3. Изменяя усиление и длительность развертки осциллографа, установить изображение, удобное для наблюдения.

4.5.3.4. Зарисовать осциллограммы напряжений на емкости $u_{C_1}(t)$ (гнездо Г4) и сопротивлении R_4 $u_{R_4}(t)$ (гнездо Г9) для трех значений сопротивления R_2 : 0,7 кОм, 2,5 кОм и 14 кОм. Определить время установления переходного процесса.

4.5.4. Исследование переходного процесса в RC-цепи при отключении от источника постоянного напряжения E_1

4.5.4.1. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации от-

рицательными импульсами.

4.5.4.2. Выполнить пункты 4.5.3.2 ... 4.5.3.4.

4.5.5. Исследование переходного процесса в RC -цепи при подключении к источнику постоянного напряжения E_1

4.5.5.1. Установить переключатель $S2$ в положение «3».

4.5.5.2. Наблюдать осциллограммы напряжений на емкости $u_{C_2}(t)$ (гнездо Г4) и сопротивлении R_4 $u_{R_4}(t)$ (гнездо Г9).

4.5.5.3. Выполнить 4.5.3.3.

4.5.5.4. Зарисовать осциллограммы напряжений на емкости $u_{C_2}(t)$ (гнездо Г4) и сопротивлении R_4 $u_{R_4}(t)$ (гнездо Г9) для трех значений сопротивления R_2 : 0,7 кОм, 2,5 кОм и 14 кОм. Определить время установления переходного процесса.

4.5.6. Исследование переходного процесса в RC -цепи при отключении от источника постоянного напряжения E_1

4.5.6.1. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации отрицательными импульсами.

4.5.6.2. Выполнить пункты 4.5.5.2 ... 4.5.5.4.

4.5.7. Исследование переходного процесса в RL -цепи при подключении к источнику постоянного напряжения E_1

4.5.7.1. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации положительными импульсами.

4.5.7.2. Установить переключатель $S2$ в положение «4».

4.5.7.3. Наблюдать осциллограммы напряжений на индуктивности $u_{L_1}(t)$ (гнездо Г4) и сопротивлении R_4 $u_{R_4}(t)$ (гнездо Г9).

4.5.7.4. Изменяя усиление и длительность развертки осциллографа, установить изображение, удобное для наблюдения.

4.5.7.5. Зарисовать осциллограммы напряжений на индуктивности $u_{L_1}(t)$ (гнездо Г4) и сопротивлении R_4 $u_{R_4}(t)$ (гнездо Г9) для трех значений сопротивления R_2 : 0,7 кОм, 2,5 кОм и 14 кОм. Определить время установления переходного процесса.

4.5.8. Исследование переходного процесса RL -цепи при отключении от источника постоянного напряжения E_1

4.5.8.1. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации отрицательными импульсами.

4.5.8.2. Выполнить пункты 4.5.7.3...4.5.7.5.

4.5.9. Исследование переходного процесса RC -цепи при подключении источника с гармонической ЭДС

4.5.9.1. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации отрицательными импульсами.

4.5.9.2. Установить переключатель $S1$ в положение «2».

4.5.9.3. Установить переключатель $S2$ в положение «3».

4.5.9.4. Подключить вход «Y» осциллографа к гнезду Г3 и зарисовать осциллограмму напряжения.

4.5.9.5. Наблюдать осциллограммы напряжений на емкости $u_{C_2}(t)$

(гнездо Г4).

4.5.9.6. Изменяя сопротивление R_2 , установить длительность переходного процесса $t_{уст} = (4...6)T$, где T — период гармонического напряжения.

4.5.9.7. Снять зависимость амплитуды «выброса» переходного процесса от начальной фазы ψ_1 входного гармонического колебания, значения которой задать от 0° до 360° с шагом 45° (переключатель «Фаза»). Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

ψ_1	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
U									

4.5.9.8. Зарисовать осциллограммы напряжений на емкости $u_{C_2}(t)$ (гнездо Г4) при значениях начальной фазы ψ_1 , соответствующих максимуму положительного «выброса», максимуму отрицательного «выброса» и отсутствию «выбросов» переходного процесса. Определить время установления переходного процесса.

4.5.10. Исследование переходного процесса в RL -цепи при подключении источника с гармонической ЭДС

4.5.10.1. Установить переключатель $S1$ в положение «4».

4.5.10.2. Наблюдать осциллограммы напряжений на индуктивности $u_{L_1}(t)$ (гнездо Г4).

4.5.10.3. Выполнить пункты 4.5.9.2...4.5.9.8.

4.6. Обработка результатов измерений

4.6.1. По экспериментальным данным определить длительность переходных процессов и постоянную времени в последовательных RC и RL -цепях при подключении и отключении от источника постоянного напряжения.

4.7. Оформление отчета

4.7.1. Сформулировать цель работы.

4.7.2. Привести функциональную схему лабораторной установки.

4.7.3. Привести результаты расчета постоянных времени последовательной RC и RL -цепей.

4.7.4. Представить расчетные графики переходных процессов в последовательной RC и RL -цепях при включении и выключении источника постоянного напряжения.

4.7.5. Представить результаты расчета начальных фаз переходных процессов в последовательных RC и RL -цепях при подключении источника гармонической ЭДС.

4.7.6. Привести таблицы с экспериментальными данными и построить по ним графики.

4.8. Выводы

В выводах необходимо отметить следующее.

4.8.1. Сравнить результаты выполненных расчетов и эксперимента.

4.8.2. Указать причины возможных несовпадений экспериментальных данных и теоретических расчетов.

4.9. Контрольные вопросы

4.9.1. В чем состоит причина возникновения переходных процессов в электрических цепях?

4.9.2. В каких электрических цепях протекают переходные процессы и почему?

4.9.3. Сформулировать законы коммутации.

4.9.4. Какими методами можно решить задачу анализа переходного процесса? Назвать их достоинства и недостатки.

4.9.5. Что следует понимать под начальными условиями? Виды начальных условий.

4.9.6. Чем определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего переходной процесс?

4.9.7. Какой физический смысл имеют свободная и вынужденная составляющие переходного процесса?

4.9.8. Дать определение постоянной времени цепи. Как определяется время установления переходного процесса?

4.9.9. Каковы особенности переходного процесса при подключении RC и RL -цепей к источнику с гармонической ЭДС?

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

5.1. Цель работы

Исследования переходных процессов в RLC -цепях второго порядка при подключении и отключении источников постоянного напряжения и гармонической ЭДС.

5.2. Теоретические сведения

Рассмотрим схему последовательной RLC -цепи, показанную на рис. 5.1.

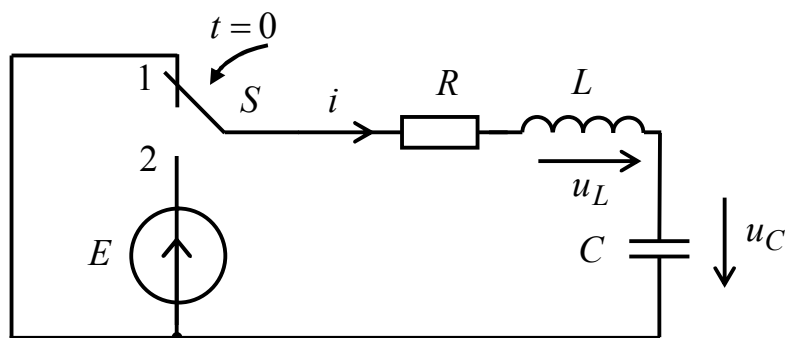


Рис. 5.1 — Схема подключения последовательной RLC -цепи к источнику постоянного напряжения E

Последовательная RLC -цепь содержит два независимо включенных реактивных элемента, поэтому переходные процессы в ней описываются дифференциальным уравнением второго порядка.

В момент времени $t = 0_-$, непосредственно предшествующей коммутации, цепь находится в установившемся состоянии. При этом в схеме отсутствуют источники энергии и ток, протекающий в цепи, равен нулю. Соответственно, напряжение на емкости и ток индуктивности равны нулю. На основании первого закона коммутации определяем независимые начальные условия:

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0; \quad (5.1)$$

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0. \quad (5.2)$$

В момент времени $t = 0$ в рассматриваемой цепи происходит переключение ключа S из положения 1 в положение 2. Система уравнений электрического равновесия после коммутации имеет вид

$$\begin{cases} u_R + u_L + u_C = E; \\ u_L = L \frac{di}{dt}; \\ u_R = Ri; \\ u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt; \\ i_R = i_L = i_C = i. \end{cases} \quad (5.3)$$

Используя (5.3), составим уравнение электрического равновесия цепи относительно тока i

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E. \quad (5.4)$$

Продифференцировав обе части уравнения (5.4), получим дифференциальное уравнение цепи после коммутации

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0. \quad (5.5)$$

Определим начальные значения тока цепи i и его первой производной по времени. Начальное значение тока цепи i в момент времени, непосредственно следующей за коммутацией, равно току индуктивности

$$i(0_+) = i_L(0_+) = 0. \quad (5.6)$$

Значение первой производной при $t = 0_+$ определяется из (5.4) с использованием независимых начальных условий (5.1) и (5.2), в момент времени $t = 0_+$

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0_+} = \frac{E}{L}. \quad (5.7)$$

Решение дифференциального уравнения (5.4) представим в виде суммы свободной и вынужденной составляющих

$$i = i_{св} + i_{вын}. \quad (5.8)$$

После коммутации ключа S в цепи при $t \rightarrow \infty$ устанавливается режим постоянного тока. При этом ток, протекающий по цепи, будет равен нулю, а напряжение на емкости будет равно E . Следовательно, вынужденная составляющая тока равна

$$i_{вын} = 0. \quad (5.9)$$

Уравнению (5.5) соответствует характеристическое уравнение

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0, \quad (5.10)$$

корни которого равны

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}},$$

или

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_p^2}, \quad (5.11)$$

где δ — коэффициент затухания последовательной RLC -цепи; $\delta = 1/\tau_{RLC}$; $\tau_{RLC} = 2L/R$ — постоянная времени последовательной RLC -цепи; ω_p — резонансная частота колебательного контура.

В зависимости от добротности Q цепи ($Q = \omega_p/2\delta$) корни характеристического уравнения (5.10) могут быть:

- 1) вещественными различными — $Q < 0,5$;
- 2) вещественными одинаковыми — $Q = 0,5$;
- 3) комплексно-сопряженными — $Q > 0,5$.

Решение дифференциального уравнения (5.5) имеет вид

$$i = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (5.12)$$

где A_1, A_2 — постоянные интегрирования.

Для определения постоянных интегрирования A_1 и A_2 продифференцируем (5.12). В результате получим уравнение

$$\frac{di}{dt} = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}. \quad (5.13)$$

Подставив зависимые начальные условия (5.6) и (5.7) в уравнения (5.12) и (5.13), составим систему уравнений относительно A_1 и A_2 :

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = 0; \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 = \frac{E}{L}. \end{cases} \quad (5.14)$$

Решение системы (5.14) с учетом (5.11) имеет вид

$$A_1 = \frac{E}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_p^2}}; \quad A_2 = \frac{-E}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_p^2}}. \quad (5.15)$$

Рассмотрим решение (5.12) при различных корнях характеристического уравнения (5.10).

При вещественно-различных корнях ($Q < 0,5$), подставив (5.15) в (5.12), определим ток цепи i

$$i = \frac{E}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_p^2}} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (5.16)$$

На рис. 5.2 изображены зависимости напряжений на индуктивности $u_L(t)$, емкости $u_C(t)$ и тока $i(t)$ последовательной RLC -цепи при $Q < 0,5$.

Из рис. 5.2 видно, что переходной процесс при добротности контура

$Q < 0,5$ носит *апериодический* (неколебательный) характер.

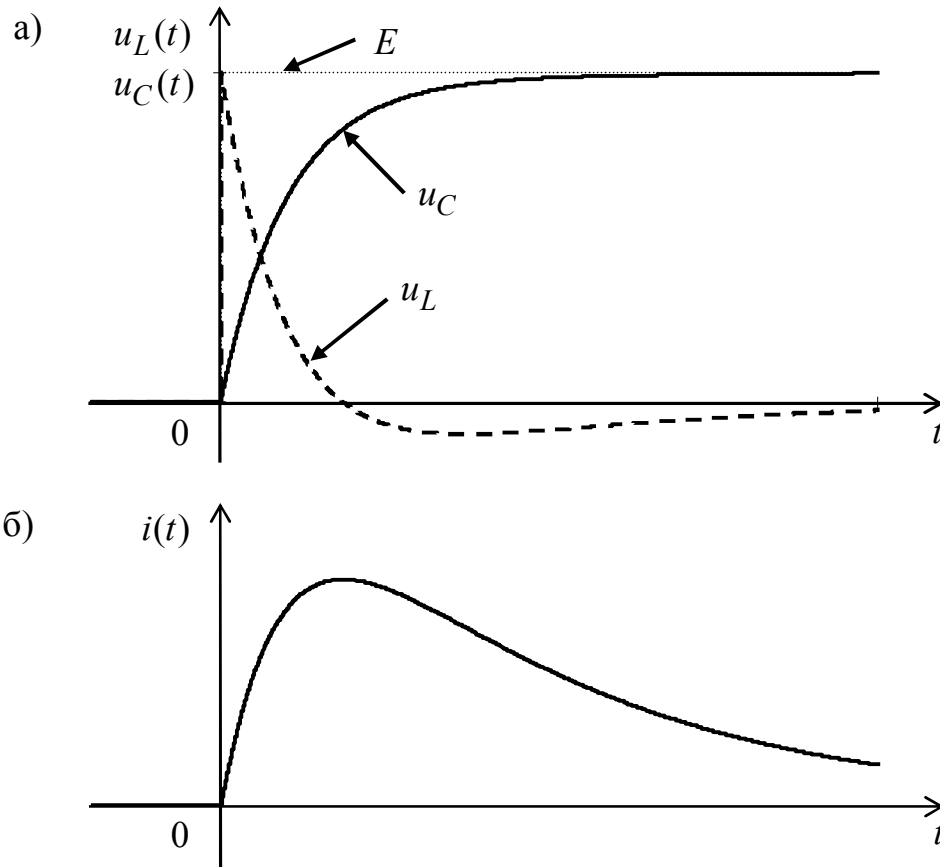


Рис. 5.2 — Временные зависимости напряжения на емкости $u_C(t)$ (а), напряжения на индуктивности $u_L(t)$ (а) и тока $i(t)$ (б) в последовательной RLC -цепи при добротности $Q < 0,5$

Добротность Q , равная 0,5, является предельным условием существования в цепи апериодических свободных колебаний. Режим работы цепи на границе между колебательным и апериодическим характером переходных процессов называется *критическим*.

При добротности $Q > 0,5$ корни характеристического уравнения (5.10) становятся комплексно-сопряженными

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{св}, \quad (5.17)$$

где $\omega_{св} = \sqrt{\omega_p^2 - \delta^2}$ — частота свободных колебаний в цепи, которая при $Q \gg 0,5$ и $\delta \ll 1$ совпадает с резонансной частотой цепи $\omega_{св} \approx \omega_p$.

При этом постоянные интегрирования A_1 и A_2 в соответствии с (5.15) и (5.16) становятся равными:

$$A_1 = \frac{E}{2j\omega_{св}L}; \quad A_2 = \frac{-E}{2j\omega_{св}L}. \quad (5.18)$$

Подставив (5.18) в (5.12), и выполнив ряд преобразований, получим

$$i = \frac{E}{2\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t) \text{ или } i = I_m(t) \sin(\omega_{\text{св}} t), \quad (5.19)$$

где

$$I_m(t) = \frac{E}{2\omega_p L} e^{-\delta t}. \quad (5.20)$$

Таким образом, переходной процесс в последовательной RLC -цепи при добротности $Q > 0,5$ имеет *колебательный* характер. При этом ток цепи i представляет осциллирующую функцию, амплитуда которой уменьшается во времени по экспоненциальному закону (5.20).

На рис. 5.3 изображены зависимости напряжений на емкости $u_C(t)$, на индуктивности $u_L(t)$ и тока $i(t)$ последовательной RLC -цепи при $Q > 0,5$.

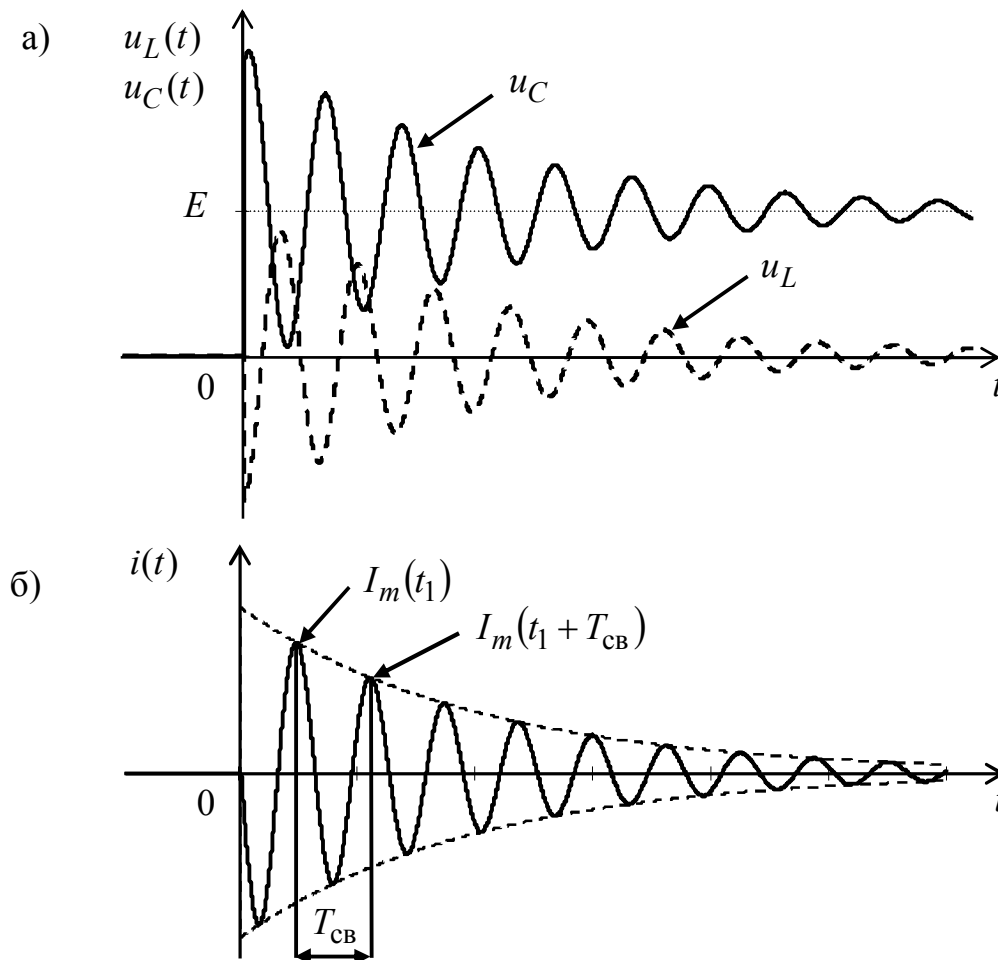


Рис. 5.3 — Временные зависимости напряжения на емкости $u_C(t)$ (а), на индуктивности $u_L(t)$ (а) и тока $i(t)$ (б) в последовательной RLC -цепи при добротности $Q > 0,5$

Соотношения $\pm I_m(t)$ (5.20) называются огибающими переходного процесса. За промежуток времени t , равный τ_{RLC} , амплитуда огибающей уменьшится в e раз. Скорость затухания колебаний может быть охарактеризована логарифмическим декрементом затухания θ , равными натуральному логарифму отношения двух максимальных значений тока, взятых через период свободных колебаний $T_{\text{св}} = 2\pi/\omega_{\text{св}}$:

$$\theta = \frac{I_m(t_1)}{I_m(t_1 + T_{св})} = \frac{\pi}{\sqrt{Q^2 - 0,25}}. \quad (5.21)$$

Из выражения (5.21) следует, что логарифмический декремент затухания θ зависит только от добротности цепи.

Рассмотрим подключение последовательной RLC -цепи с высокой добротностью $Q \gg 0,5$ к источнику гармонической ЭДС $e(t)$:

$$e(t) = E_m \sin(\omega_1 t). \quad (5.22)$$

где ω_1 — круговая частота колебания.

Если частота гармонического воздействия ω_1 совпадает с частотой свободных колебаний $\omega_{св}$, то есть с резонансной частотой ω_0 RLC -цепи, то ток в цепи равен [2]:

$$i = I_{m\text{вын}}(1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega_p t), \quad (5.23)$$

где $I_{m\text{вын}}$ — амплитуда вынужденной составляющей тока;
 $I_{m\text{вын}} = E_m / \sqrt{R^2 + (\omega_1 L - 1/\omega_1 C)^2}$.

На рис. 5.4 изображена зависимость тока $i(t)$ в последовательной RLC -цепи в случае $Q \gg 0,5$ при подключении к источнику гармонической ЭДС с частотой, равной резонансной частоте цепи.

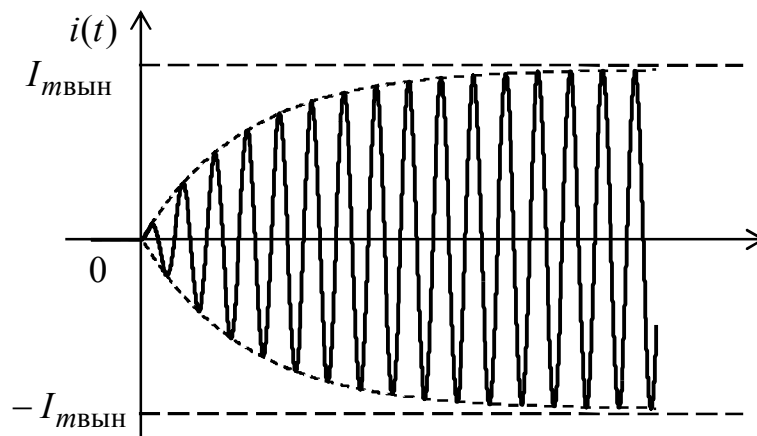


Рис. 5.4 — Ток $i(t)$ в последовательной RLC -цепи в случае $Q \gg 0,5$ при подключении к источнику гармонической ЭДС с частотой ω_p

Из рис. 5.4 видно, что амплитуда плавно увеличивается во времени, стремясь в пределе к установившемуся значению $I_{m\text{вын}}$.

Если частота гармонического воздействия ω не совпадает с резонансной частотой ω_0 последовательной RLC -цепи ($\omega \neq \omega_p$) и коэффициент затухания δ равен нулю (добротность равна бесконечности), то ток цепи равен [2]

$$i = 2I_{m\text{вын}} \sin\left(\frac{\omega - \omega_p}{2}t\right) \cos\left(\frac{\omega + \omega_p}{2}t - \varphi\right), \quad (5.24)$$

где φ — аргумент комплексного входного сопротивления цепи.

В этом случае наблюдаются биения, частота повторения максимумов ω_6 которых равна

$$\omega_6 = |\omega - \omega_p|. \quad (5.25)$$

На рис. 5.5 показана зависимость тока $i(t)$ в последовательной RLC -цепи для случая $Q \gg 0,5$ при подключении к источнику гармонической ЭДС с частотой, отличающейся от резонансной частоты цепи и с бесконечно большой добротностью.

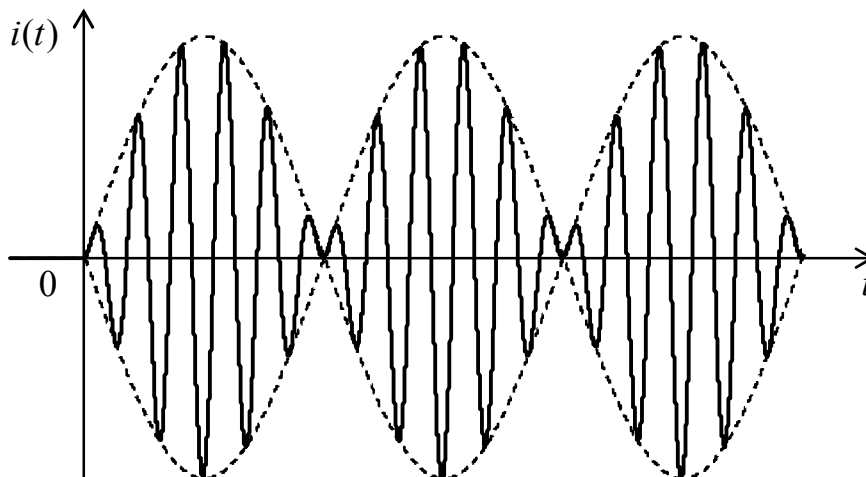


Рис. 5.5 — Ток $i(t)$ в последовательной RLC -цепи для случае $Q \gg 0,5$ при подключении к источнику гармонической ЭДС с частотой, отличающейся от резонансной частоты контура

В реальных RLC -цепях коэффициент затухания δ не равен нулю, поэтому амплитуда свободной составляющей тока уменьшается во времени, а биения имеют затухающий характер.

Постоянная времени последовательной RLC -цепи τ_{RLC} имеет вид

$$\tau_{RLC} = \frac{2L}{R}. \quad (5.26)$$

5.3. Предварительный расчет

5.3.1. Рассчитать постоянную времени τ_{RLC} и длительность переходного процесса $t_{уст}$ для последовательной RLC -цепи при параметрах элементов: $R=2,5$ кОм; $R=14$ кОм, $C=6200$ пФ.

5.3.2. Рассчитать и построить графики напряжений на емкости, на индуктивности и тока переходного процесса в последовательной RLC -цепи при включении источника постоянного напряжения $E = 1,5$ В, используя параметры цепи из п. 5.3.1.

5.4. Описание лабораторного макета

Функциональная схема лабораторной установки для исследования пере-

ходных процессов первого и второго порядков показана на рис. 4.12. Внешний вид лабораторного макета изображен на рис. 4.13.

5.5. Порядок выполнения работы.

5.5.1. Подготовка к работе

- 5.5.1.1. Подключить лабораторный макет к блоку питания.
- 5.5.1.2. Включить блок питания, генератор НЧ и осциллограф.
- 5.5.1.3. Выход генератора НЧ подключить к гнезду Г1.
- 5.5.1.4. Вход «Y» осциллографа подключить к гнезду Г3, а вход «X» — к гнезду Г2.
- 5.5.1.5. Переключить осциллограф в режим внешней синхронизации положительными импульсами.
- 5.5.1.6. Переключатель $S1$ на панели макета перевести в положение «1».
- 5.5.1.7. Установить на выходе генератора гармоническое напряжение амплитудой 5 В и частотой 10 кГц.

5.5.2. Исследование переходного процесса в последовательной RLC -цепи при подключении источника постоянного напряжения $E_1=1,5$ В

- 5.5.2.1. Установить переключатель $S2$ в положение «5».
- 5.5.2.2. Получить аperiodический характер переходного процесса, наблюдаемого на осциллографе, путем изменения сопротивления R_2 .
- 5.5.2.3. Изменяя усиление и длительность развертки осциллографа, установить изображение, удобное для наблюдений.
- 5.5.2.4. Зарисовать осциллограммы входного напряжения $u_{вх}(t)$ (гнездо Г3), напряжения на индуктивности $u_{L7}(t)$ (гнездо Г5) и напряжения на сопротивлении $R4$ $u_{R4}(t)$ (гнездо Г9). Записать значение R_2 .
- 5.5.2.5. Изменяя сопротивление R_2 , получить колебательный характер переходного процесса, наблюдаемого на осциллографе.
- 5.5.2.6. Выполнить пункт 5.5.2.3 и 5.5.2.4. Записать значения R_2 и R_4 . По осциллограмме $u_{R4}(t)$ измерить и записать следующие параметры:
 - значение огибающей переходного процесса при $t = 0$;
 - период свободных колебаний $T_{св}$;
 - два амплитудных значений, отстоящие на период;
- 5.5.2.7. Определить значение R_2 , соответствующее критическому режиму. Записать величину R_2 .

5.5.3. Исследование переходного процесса в последовательной RLC -цепи при подключении источника гармонической ЭДС

- 5.5.3.1. Переключатель $S1$ на панели макета перевести в положение «2».
- 5.5.3.2. Вход «Y» осциллографа подключить к гнезду Г5.
- 5.5.3.3. Установить значение R_2 , соответствующее колебательному процессу.
- 5.5.3.4. Наблюдать на осциллографе переходной процесс.
- 5.5.3.5. Изменяя частоту генератора, получить осциллограмму, соответствующую случаю $\omega = \omega_p$ (рис. 5.4). Зарисовать осциллограмму и записать частоту генератора.

5.5.3.6. Изменяя частоту генератора, получить осциллограмму биеений, соответствующую случаю $\omega \neq \omega_p$ (рис. 5.5). Зарисовать осциллограмму и записать частоту генератора.

5.6. Обработка результатов измерений

5.6.1. По полученным осциллограммам для колебательного процесса определить значения $T_{св}$, $\omega_{св}$, ω_0 , θ , δ и τ_{RLC} .

5.6.2. Сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований.

5.7. Оформление отчета

В отчете необходимо привести:

5.7.1. Цель работы.

5.7.2. Функциональную схему лабораторной установки.

5.7.3. Графики осциллограмм переходных процессов при подключении источника постоянного напряжения и гармонической ЭДС.

5.7.4. Параметры переходного процесса: $T_{св}$, $\omega_{св}$, θ , δ .

5.7.5. Параметры электрической цепи: R , L , C , Q , τ .

5.8. Выводы

В выводах необходимо отметить следующее.

5.8.1. Сопоставить результаты выполненных расчетов и эксперимента.

5.8.2. Указать причины возможных несовпадений между экспериментальными данными и теоретическими результатами.

5.9. Контрольные вопросы

5.9.1. Назвать причину возникновения переходных процессов в электрических цепях.

5.9.2. В каких электрических цепях протекают переходные процессы?

5.9.3. Сформулировать законы коммутации.

5.9.4. Какими методами можно решить задачу анализа переходного процесса? Их достоинства и недостатки.

5.9.5. Чем определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего переходной процесс?

5.9.6. Какой физический смысл имеют свободная и вынужденная составляющие переходного процесса?

5.9.7. Что называется постоянной времени RLC - цепи? Как определяется время установления переходного процесса?

5.9.8. Чем определяется характер переходного процесса при подключении RLC -цепи к источникам а) постоянного напряжения б) с гармонической ЭДС?

5.9.9. Какие параметры RLC - цепи характеризуют скорость затухания свободной составляющей переходного процесса?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ДЛИННОЙ ЛИНИИ

6.1. Цель работы

Исследования распределения напряжения вдоль однородной длинной линии при различных значениях сопротивления нагрузки.

6.2. Теоретические сведения

Длинной линией называют линию передачи, размеры которой соизмеримы с длиной электромагнитной волны.

Электрические цепи, размеры l которых нельзя считать малыми по сравнению с длиной электромагнитной волны λ ($l \geq (0,05 \dots 0,1)\lambda$) — это различные типы линий передачи электромагнитной энергии, антенны и другие устройства. В таких цепях невозможно выделить сосредоточенные элементы R , L , C . Такие цепи называются цепями с распределенными параметрами.

Одной из разновидностей таких цепей, которая находит широкое применение в радиотехнике, является цепь переменного тока, образованная двумя параллельными проводниками большой протяженности l ($l \gg \lambda$).

Схема открытой двухпроводной линии, нагруженной на сопротивление Z_n , изображена на рис. 6.1а.

Эквивалентная схема бесконечно малого элементарного участка длиной dx такой линии изображена на рис. 6.1б.

В общем случае каждый элементарный отрезок линии обладает бесконечно малыми индуктивностью $dL = L_1 dx$, емкостью $dC = C_1 dx$, сопротивлением потерь $dR = R_1 dx$ и проводимостью потерь $dG = G_1 dx$.

Параметры L_1 , C_1 , R_1 , G_1 называют погонными (приходящимися на единицу длины) параметрами линии. Если значения погонных параметров не изменяются вдоль длины линии, то такая линия называется *однородной*.

При условии $\omega L_1 \gg R_1$ и $\omega C_1 \gg G_1$, линию считают линией без потерь и полагают, что $R_1 = 0$ и $G_1 = 0$. При этом эквивалентная схема участка цепи имеет вид, показаны на рис. 6.1в.

Из рассмотрения эквивалентной схемы отрезка длинной линии без потерь (рис. 6.1в) следует, что можно создать искусственную длинную линию путем каскадного соединения одинаковых звеньев; схема такой линии показана на рис. 6.2.

Чем больше звеньев имеет искусственная линия, тем более схожи процессы, происходящие в ней, с процессами в реальной двухпроводной линии.

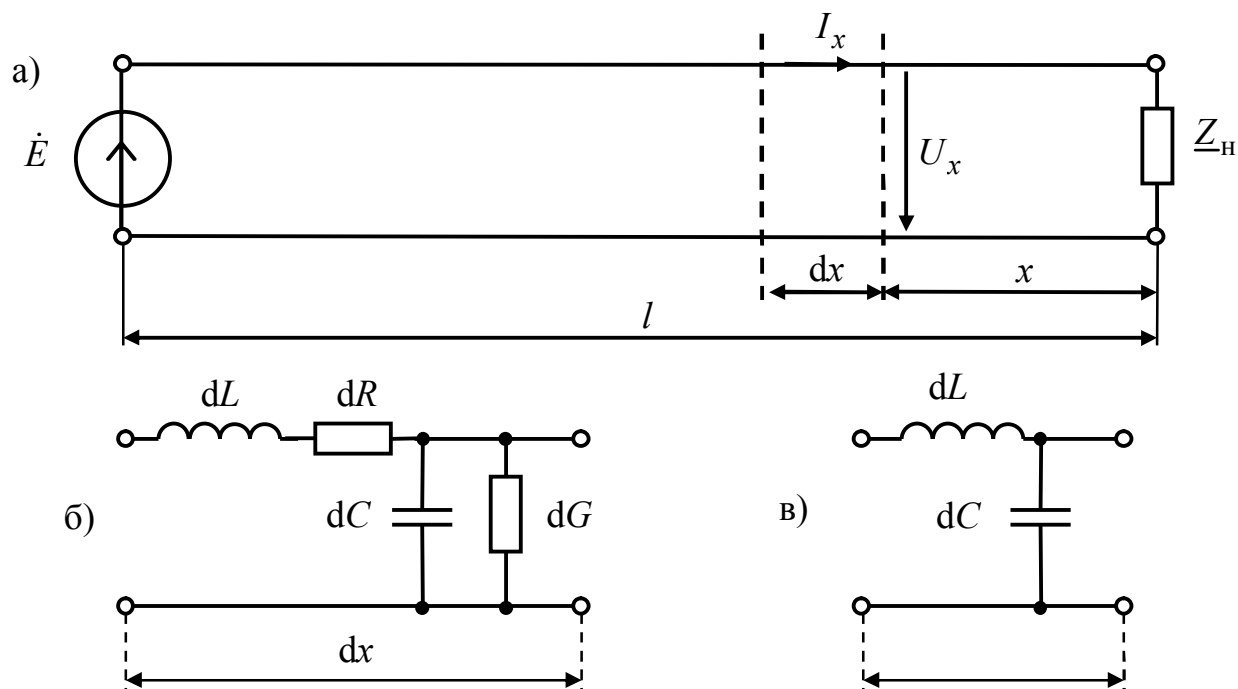


Рис. 6.1 — Двухпроводная линия (а), эквивалентная схема участка dx (б), эквивалентная схема участка линии без потерь (в).

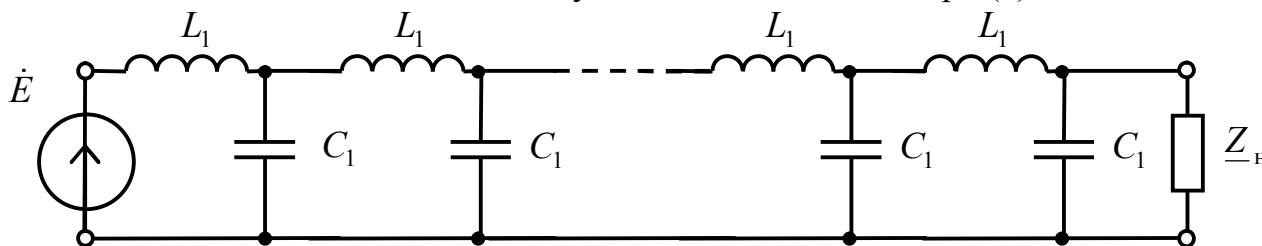


Рис. 6.2 — Схема искусственной длинной линии

В двухпроводной линии без потерь электромагнитные волны распространяются вдоль линии с конечной скоростью [2]

$$V = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (6.1)$$

Следовательно, сигналы в различных точках длинной линии возникают не в момент появления сигнала на входе, а несколько позднее, причем время запаздывания τ_3 зависит от длины линии l и скорости V

$$\tau_3 = \frac{l}{V} = l\sqrt{L_1 C_1}. \quad (6.2)$$

Таким образом, длинная линия без потерь является идеальной линией задержки. Время задержки искусственной линии $\tau_{3и}$ [2]

$$\tau_{3и} = n\sqrt{L_1 C_1}, \quad (6.3)$$

где L_1 и C_1 — индуктивность и емкость каждого из n звеньев линии.

Определим частоту f генератора, подключенного к искусственной линии, состоящей из n звеньев, при которой эквивалентная длина линии будет

равна длине волны генератора. Если $\tau_{\text{зи}}$ равна периоду колебаний T , то расстояние, которое проходит волна за это время, равно длине волны λ . Следовательно, частота сигнала f , при которой искусственная линия эквивалентна реальной линии длиной λ , равна

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{n\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (6.4)$$

Используя известное соотношение $\lambda = c/f$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света, с учетом (6.4), получаем

$$\lambda = cn\sqrt{L_1 C_1} = l_{\text{экв}}, \quad (6.5)$$

где $l_{\text{экв}}$ — длина реальной двухпроводной линии, эквивалентной искусственной линии.

Таким образом, если для искусственной линии, состоящая из n звеньев с индуктивностью L_1 и емкостью C_1 , на частоте f выполняется условие (6.4), то это линия эквивалентна двухпроводной линии (с погонными индуктивностью L_1 и емкостью C_1) длиной $l_{\text{экв}}$, равной λ . Если частоту генератора уменьшить, например, в четыре раза, то в линии уложится четверть длины волны $\lambda/4$.

Волновое сопротивление линии $\underline{Z}_0$ в общем случае определяется [2, 3]

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}}, \quad (6.6)$$

а в линии без потерь

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (6.7)$$

Постоянная распространения $\underline{\gamma}$ длинной линии представляет собой комплексную величину, которая рассчитывается по формуле

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)}. \quad (6.8)$$

Вещественная часть постоянной распространения α характеризует затухание в линии, а мнимая часть β — фазовую постоянную.

В линии без потерь ($\alpha = 0$) постоянная распространения $\underline{\gamma}$ равна

$$\underline{\gamma} = j\omega\sqrt{L_1 C_1} = j\beta. \quad (6.9)$$

Структура поля в длинной линии определяется как суперпозиция двух волн — падающей и отраженной, распространяющиеся в противоположных направлениях (к нагрузке и от нагрузки соответственно).

Во всех случаях, когда линия нагружена на сопротивление, отличное от волнового $\underline{Z}_0$, в линии имеет место отражение падающей волны от нагрузки, причем коэффициент отражения $\underline{\rho}$ определяется из выражения

$$\underline{\rho} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_n} = \frac{\underline{Z}_n - \underline{Z}_0}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_0} = |\underline{\rho}| e^{j\varphi}, \quad (6.10)$$

где $\dot{U}_o$ — напряжение отраженной волны; $\dot{U}_n$ — напряжение падающей волны; $\underline{Z}_n$ — сопротивление нагрузки; $|\underline{\rho}|$ — модуль коэффициента отражения, определяемый как отношение амплитуд отраженной и падающей волн; φ — аргумент комплексного коэффициента отражения, определяемый как сдвиг фаз между отраженной и падающей волнами в месте подключения нагрузки.

В зависимости от $\underline{Z}_n$ различают следующие режимы работы линии:

а) режим *бегущей волны* — возникает в линии, если она нагружена на согласованную нагрузку ($\underline{Z}_n = \underline{Z}_0$);

б) режим *стоячих волн* — возникает в линии в следующих случаях:

— если осуществить короткое замыкание выходных зажимов ($\underline{Z}_n = 0$);

— если выходные зажимы находятся в режиме холостого хода ($\underline{Z}_n = \infty$);

— если линия нагружена на чисто реактивную нагрузку ($\underline{Z}_n = \pm jX_n$);

в) режим *смешанных волн* — возникает при работе линии на несогласованную нагрузку.

Рассмотрим распределения напряжений и токов вдоль линии при различных режимах работы. В общем случае комплексные значения напряжений и токов в любой точке линии определяются из уравнений длинной линии в показательной форме [2, 3]

$$\begin{cases} \dot{U} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_0}{2} (e^{\gamma x} + \underline{\rho} e^{-\gamma x}); \\ \dot{I} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_0}{2 \underline{Z}_0} (e^{\gamma x} - \underline{\rho} e^{-\gamma x}), \end{cases} \quad (6.11)$$

или в гиперболической форме

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma x) + \dot{I}_2 \underline{Z}_0 \operatorname{sh}(\gamma x); \\ \dot{I} = \dot{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma x) + \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_0} \operatorname{sh}(\gamma x), \end{cases} \quad (6.12)$$

где $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ — комплексные значения напряжения и тока на нагрузке; x — координата точки определения напряжения $\dot{U}$ и $\dot{I}$, отсчитываемая от конца линии (от нагрузки).

Для линии без потерь выражения (6.11) и (6.12) принимают вид

$$\begin{cases} \dot{U} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_0}{2} (e^{j\beta x} + \underline{\rho} e^{-j\beta x}); \\ \dot{I} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_0}{2 \underline{Z}_0} (e^{j\beta x} - \underline{\rho} e^{-j\beta x}); \end{cases} \quad (6.13)$$

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 \cos(\frac{2\pi}{\lambda}x) + j\dot{I}_2 Z_0 \sin(\frac{2\pi}{\lambda}x); \\ \dot{I} = \dot{I}_2 \cos(\frac{2\pi}{\lambda}x) + j\frac{\dot{U}_2}{Z_0} \sin(\frac{2\pi}{\lambda}x). \end{cases} \quad (6.14)$$

В выражениях (6.13) и (6.14) первые слагаемые представляют собой напряжения и токи падающей волны, а вторые — отраженной.

Рассмотрим режим бегущей волны в линии без потерь. Так как в этом случае $Z_{\text{н}} = Z_0$, то коэффициент отражения $\underline{\rho} = 0$ и $\dot{I}_2 Z_0 = \dot{U}_2$. С учетом этого из (6.13) получим уравнения длинной линии в этом режиме

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 e^{j\beta x}; \\ \dot{I} = \dot{I}_2 e^{j\beta x}. \end{cases} \quad (6.15)$$

Отраженная волна в этом режиме отсутствует, присутствует только падающая волна. Действующие значения тока и напряжения при этом при всех значениях будут одинаковы, то есть

$$U = U_2; \quad I = I_2. \quad (6.16)$$

Найдем входное сопротивление линии в режиме бегущей волны

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = Z_0. \quad (6.17)$$

Таким образом, при согласованной нагрузке (в режиме бегущей волны) напряжение и ток в любой точке линии без потерь равны значениям напряжения и тока соответственно на входе линии, а входное сопротивление в любом сечении равно волновому сопротивлению линии. Зависимости распределения действующих значений напряжения, тока и входного сопротивления от координаты x в режиме бегущей волны показаны на рис. 6.3.

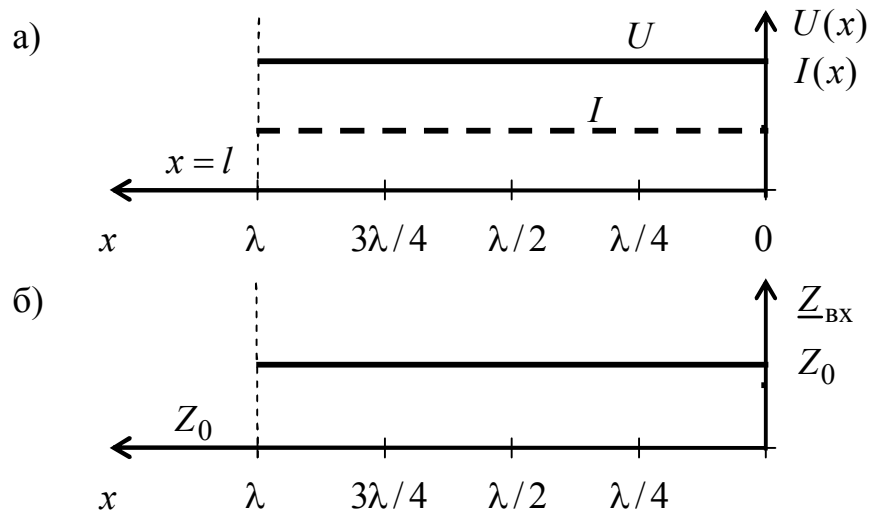


Рис. 6.3 — Зависимость действующих значений напряжения и тока (а), входного сопротивления (б) от координаты x в режиме бегущих волн

Рассмотрим режим стоячей волны в линии без потерь при холостом ходе выходных зажимов ($Z_{\text{н}} \rightarrow \infty$, $I_2 = 0$; линия разомкнута на конце). С учетом этих условий из (6.14) получим

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right); \\ \dot{I} = j\frac{\dot{U}_2}{Z_0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right). \end{cases} \quad (6.18)$$

Входное сопротивление линии $Z_{\text{вх}}$ является реактивным

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = -jZ_0 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) = jX_{\text{вх}}. \quad (6.19)$$

Из (6.10) следует, что комплексный коэффициент отражения $\underline{\rho}$ в этом режиме равен 1. Зависимость распределения напряжения, тока и реактивной части входного сопротивления вдоль линии показаны на рис. 6.4.

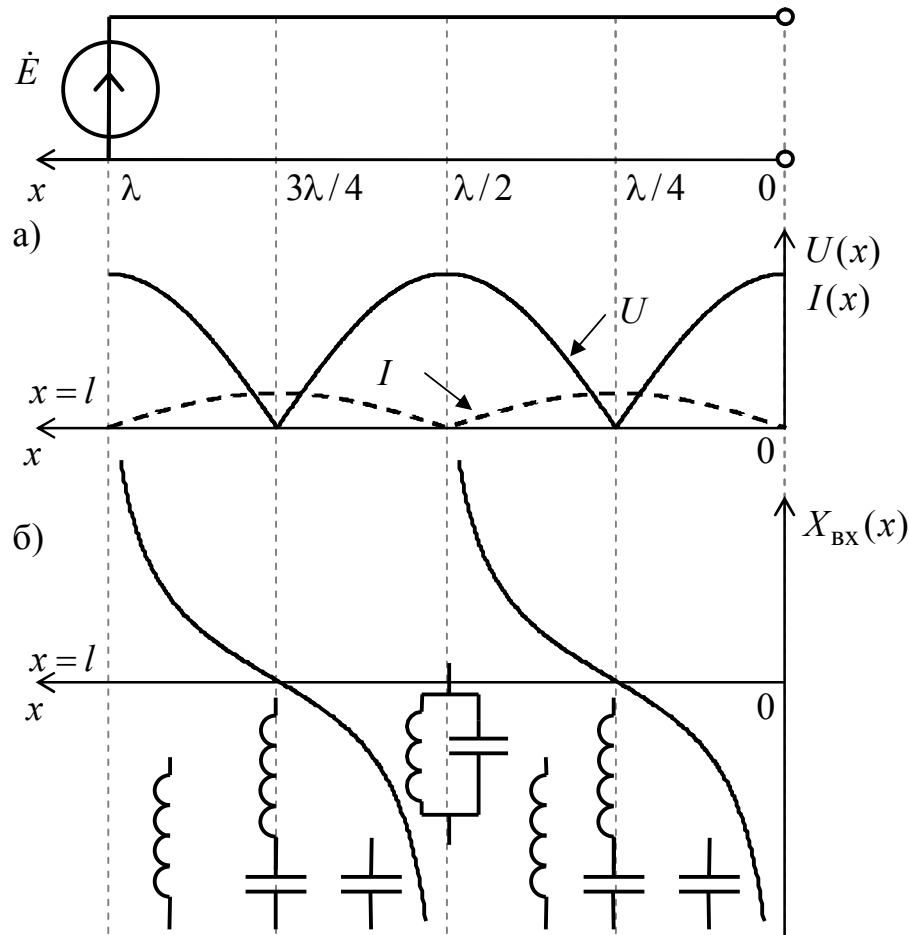


Рис. 6.4 — Зависимость действующих значений напряжения и тока (а), входного сопротивления (б) от координаты x при холостом ходе зажимов

При холостом ходе выходных зажимов амплитуды падающей $U_{\text{п}}$ и отраженной $U_{\text{о}}$ волн равны между собой. В тех точках линии, в которых падающая и отраженная волны совпадают по фазе ($x = 0, \lambda/2, \dots$) и складываются, получается пучность. В точках, для которых фазы волн противоположны

($x = \lambda/4, 3\lambda/4, \dots$) — узел. Такой режим работы длинной линии получил название «режим стоячих волн».

Из распределения входного сопротивления (см. рис. 6.4), видно, что отличающиеся по длине отрезки линии ведут себя аналогично емкости, индуктивности, последовательному или параллельному колебательному контурам.

В режиме стоячих волн при коротком замыкании выходных зажимов линии ($Z_{\text{н}} = 0, \dot{U}_2 = 0, \underline{\rho} = -1$; линия замкнута на конце) из (6.14) получим следующие уравнения линии

$$\begin{cases} \dot{U} = j\dot{I}_2 Z_0 \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x); \\ \dot{I} = \dot{I}_2 \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x). \end{cases} \quad (6.20)$$

Входное сопротивление линии $Z_{\text{вх}}$, также, как в режиме холостого хода, является реактивным

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = jZ_0 \operatorname{tg}(\frac{2\pi}{\lambda} x) = jX_{\text{вх}}. \quad (6.21)$$

Зависимости распределений действующих значений напряжения $U(x)$, тока $I(x)$ и входного сопротивления $X_{\text{вх}}(x)$ короткозамкнутой линии передачи показаны на рис. 6.5.

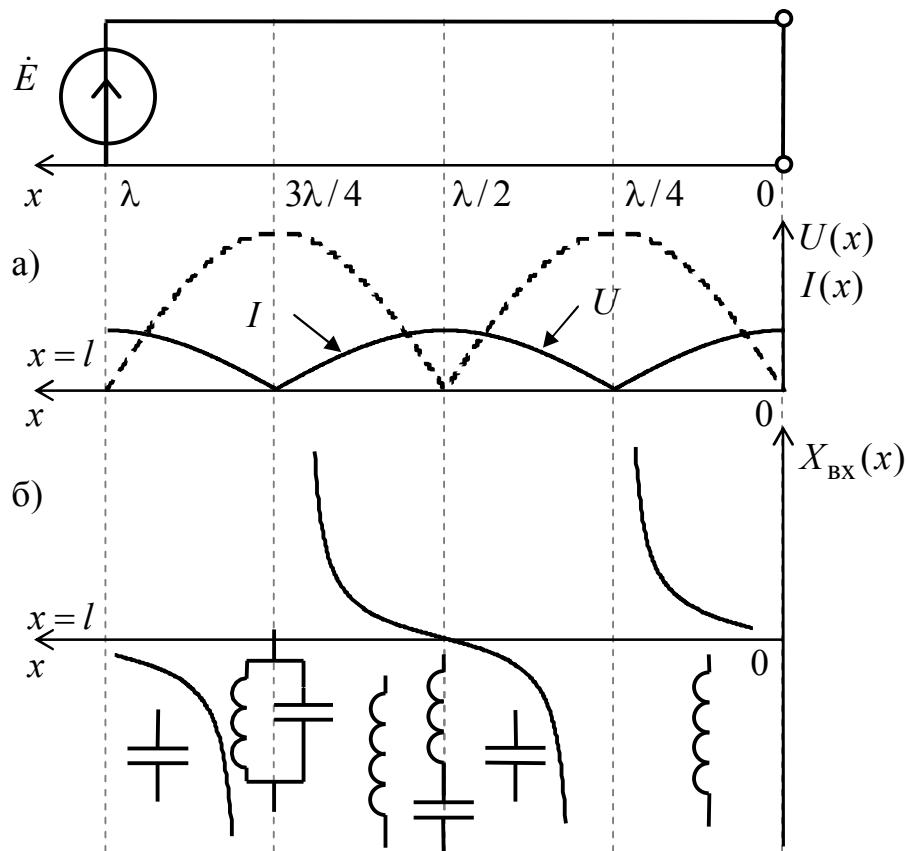


Рис. 6.5 — Зависимость распределения действующих значений напряжения и тока (а), входного сопротивления (в) от координаты x при коротком замыкании выходных зажимов

Следует отметить, что входное сопротивление короткозамкнутой линии без потерь длиной $\lambda/4$ стремится к бесконечности. Это свойство короткозамкнутых четвертьволновых отрезков линий часто используются в различных радиоэлектронных схемах и конструкциях, применяя такой отрезок линии в качестве изолятора.

При реактивной нагрузке, например, индуктивной, также образуются стоячие волны как при холостом ходе или коротком замыкании. Однако при таком характере нагрузки узлы и пучности сдвигаются вдоль линии. Если реактивная нагрузка представляет собой индуктивность, то узлы и пучности смещаются в сторону генератора, а при емкостном характере нагрузки — в сторону нагрузки.

Реактивное сопротивление нагрузки линии (см. рис. 6.6а и рис. 6.7а), можно заменить эквивалентным отрезком линии, входное сопротивление которого равно сопротивлению реактивного элемента. Например, индуктивность можно заменить короткозамкнутым отрезком линии длиной меньше $\lambda/4$ (рис. 6.6б), а емкость — разомкнутым отрезком линии длиной меньше $\lambda/4$ (рис. 6.7б) и т.п. Проведя такую замену можно построить распределения напряжений и токов в новой эквивалентной линии с учетом добавочного (за счет реактивной нагрузки) отрезка линии (рис. 6.6б и рис. 6.7б).

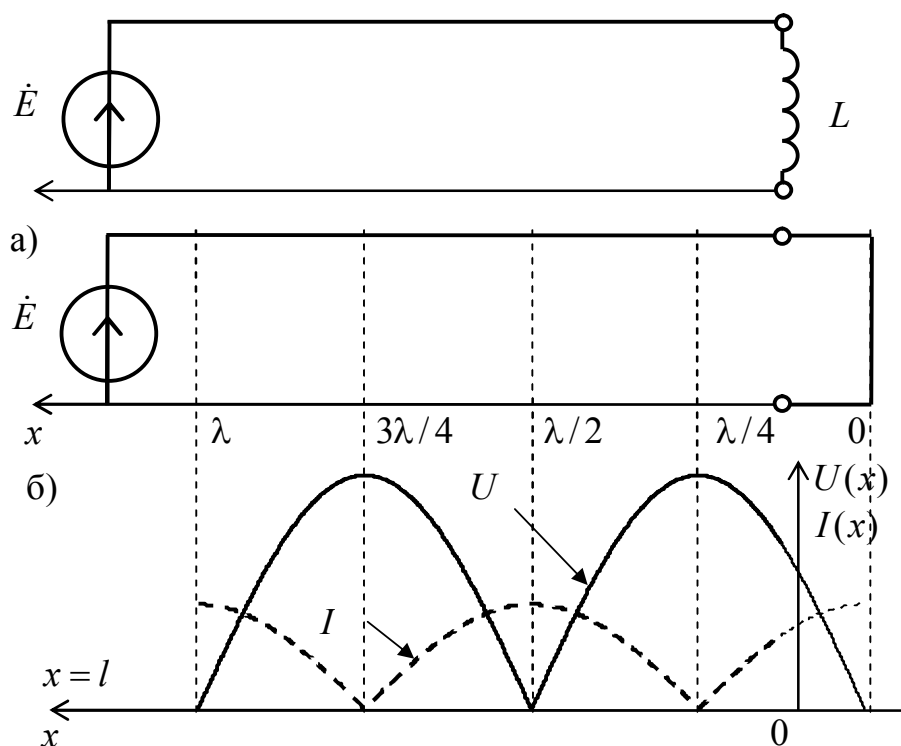


Рис. 6.6 — Распределения тока и напряжения вдоль линии, нагруженной на индуктивную нагрузку

При несогласованной нагрузке линии в линии возникает режим смешанных волн, который можно рассматривать как суперпозицию навстречу бегущих волн (падающих и отраженных). Ввиду того, что модуль комплексного коэффициента отражения в этом режиме меньше 1 ($|\rho| < 1$), амплитуда отраженной волны меньше амплитуды падающей волны. В точках противофазно-

сти волн наблюдается некоторый минимум $U_{\min} = U_{\Pi} - U_0$, а в точках фазности волн наблюдается некоторый максимум — $U_{\max} = U_{\Pi} + U_0$.

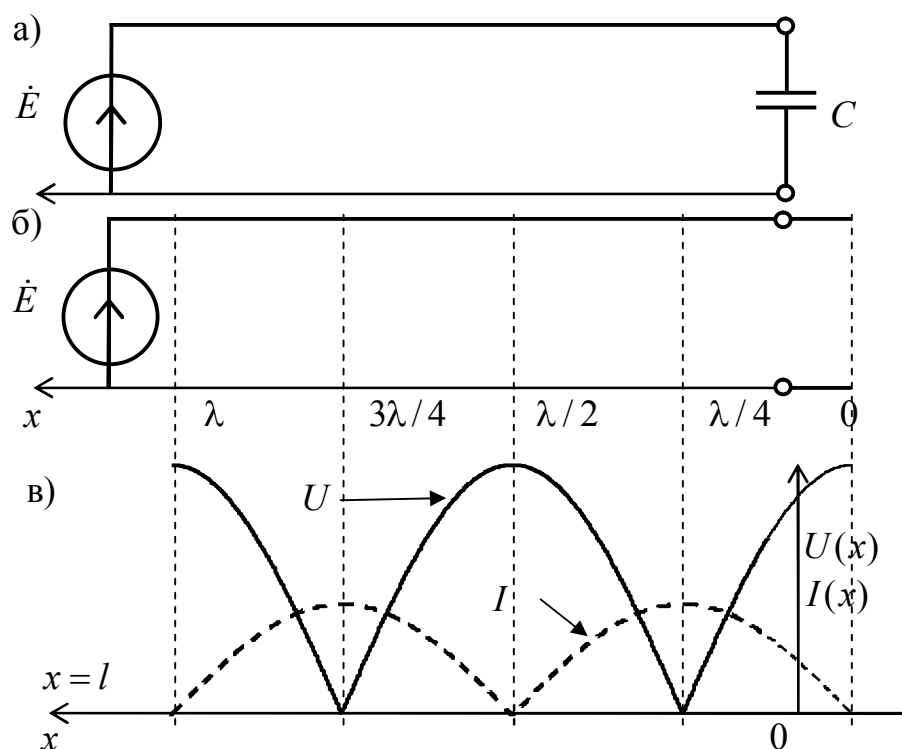


Рис. 6.7 — Распределение тока и напряжения вдоль линии, нагруженной на реактивное сопротивление с емкостным характером

На рис. 6.8 показаны зависимости распределения действующих значений напряжения или тока вдоль линии в режиме смешанных волн при работе на несогласованную нагрузку ($|Z_{\text{н}}| < Z_0$).

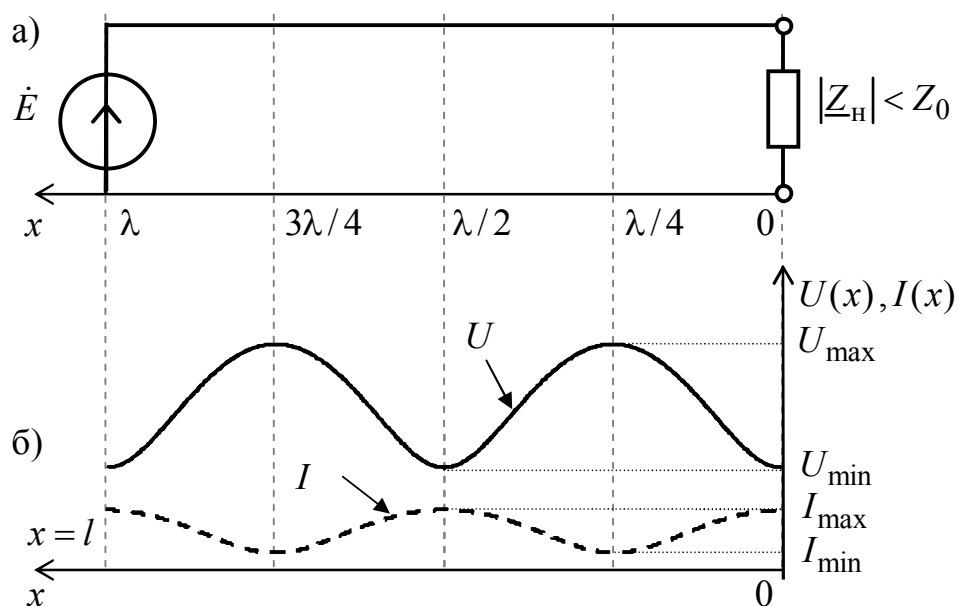


Рис. 6.8 — Зависимости распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии в режиме смешанных волн

Отношение напряжения $U_{\min}$ к напряжению $U_{\max}$ называют коэффициентом бегущей волны напряжения

$$K_{\text{бв}} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{U_{\Pi} - U_0}{U_{\Pi} + U_0} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|}. \quad (6.22)$$

Коэффициент бегущей волны можно выразить также через модуль сопротивления нагрузки $|Z_{\text{н}}|$ и волновое сопротивление линии Z_0 :

$$K_{\text{бв}} = \frac{Z_0}{|Z_{\text{н}}|} \quad (\text{при } |Z_{\text{н}}| > Z_0); \quad (6.23)$$

$$K_{\text{бв}} = \frac{|Z_{\text{н}}|}{Z_0} \quad (\text{при } |Z_{\text{н}}| < Z_0). \quad (6.24)$$

Коэффициентом стоячей волны называют величину, обратную коэффициенту бегущей волны напряжения

$$K_{\text{св}} = \frac{1}{K_{\text{бв}}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}. \quad (6.25)$$

6.3. Предварительный расчет

6.3.1. Рассчитайте частоту f , при которой на искусственной линии укладывается одна длина волны, если $L_1 = 16$ мкГн; $C_1 = 0,035$ мкФ; $n = 16$.

6.3.2. Рассчитайте геометрическую длину волны двухпроводной линии передачи $l_{\text{экв}}$, которая эквивалентна искусственной линии, если $L_1 = 16$ мкГн; $C_1 = 0,035$ мкФ; $n = 16$.

6.3.3. Сравните сопротивление потерь звена R со значением ωL_0 . Если $\omega L_0 > (5 \dots 10)R_0$, то такую линию можно считать линией без потерь. Проводимостью G_1 можно пренебречь.

6.3.4. Определить волновое сопротивление Z_0 и постоянную распространения γ линии.

6.3.5. Рассчитать и построить графики распределения действующих значений напряжения вдоль линии для режимов холостого хода и короткого замыкания, если напряжение пучности равно 2,7 В.

6.3.6. Построить зависимости $U(x)$ при индуктивной $Z_{\text{н}} = j\omega L_0$ и емкостной $Z_{\text{н}} = 1/j\omega C_0$ нагрузках.

6.4. Описание лабораторного макета

Внешний вид лабораторного макета для исследования режимов работ длинной линии показан на рис. 6.9. Макет выполнен на основе искусственной линии, включающей 16 одинаковых звеньев (рис. 6.9). От каждого звена линии имеется отвод. Все отводы пронумерованы от 0 до 16, причем нумерация

производится с конца линии. Так как линия имеет симметричную П-образную схему, то емкости крайних конденсаторов имеют величину $C_0/2$ емкости.

Активное сопротивление звена линии R_1 не превышает 1 Ом. С помощью переключателя $S1$ устанавливается необходимая нагрузка линии.

6.5. Порядок выполнения работы

6.5.1. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U = f(n)$ от номера гнезда n в линии передачи в режиме холостого хода

6.5.1.1. Подключить выход внешнего генератора к гнезду Г1. Переключатель $S1$ перевести в положение «1».

6.5.1.2. Установить частоту генератора f , значение которой получено в пункте 6.3.1 предварительного расчета с амплитудой 1 В.

6.5.1.3. Подключить вольтметр к гнезду «4» линии.

6.5.1.4. Плавно изменяя частоту генератора (в сторону увеличения или уменьшения) определить частоту, при которой напряжение в гнезде «4» минимально. При этой частоте генератора f на линии укладывается одна длина волны.

6.5.1.5. Измерить зависимость выходного напряжения вдоль линии от расстояния от нагрузки (в пронумерованных гнездах). Результаты измерения занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 — Теоретические и экспериментальные данные

Но- мер гнезда	Теоретические данные			Экспериментальные данные						
	Нагрузка Z_H			Нагрузка Z_H						
	∞	0	Z_0	∞	0	Z_0	$2Z_0$	$0,5Z_0$	jX	$-jX$
0										
1										
2										
...										
16										

6.5.2. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U(n)$ передачи в режиме короткого замыкания

6.5.2.1. Уменьшить выходное напряжение генератора до нуля. Установить переключатель $S1$ в положение 2. Вольтметр подключить к гнезду «4» линии. С помощью генератора установить в этой точке напряжение 1 В.

6.5.2.2. Выполнить пункт 6.5.1.5.

6.5.3. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U(n)$ передачи в режиме работы на согласованную нагрузку Z_0

6.5.3.1. Установить переключатель $S1$ в положение «3».

6.5.3.2. Установить на входе линии передачи напряжение равное 1 В.

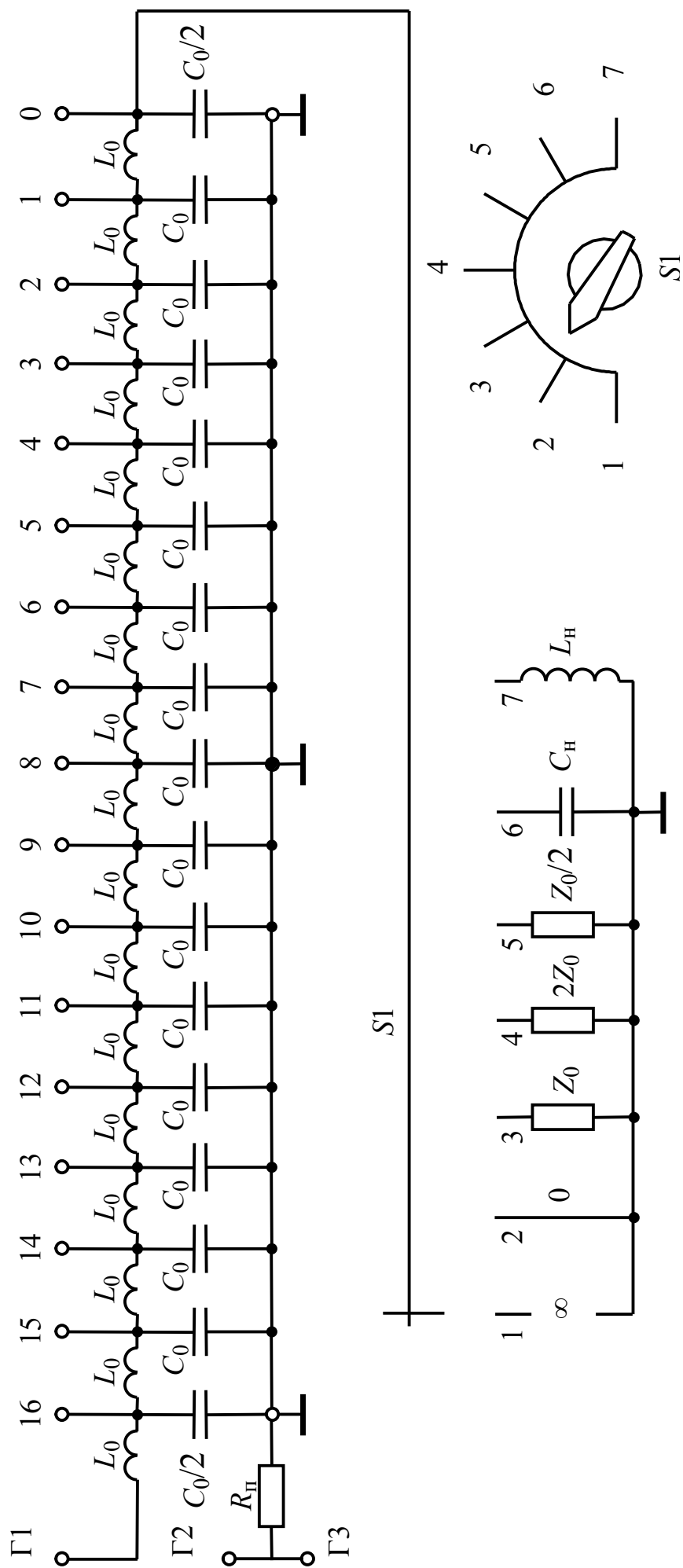


Рис. 6.9 — Внешний вид лабораторного макета

6.5.3.3. Выполнить пункт 6.5.1.5.

6.5.4. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U(n)$ передачи в режиме работы на нагрузку $2Z_0$

6.5.4.1. Установить переключатель $S1$ в положение «4».

6.5.4.2. Выполнить пункт 6.5.3.2.

6.5.4.3. Выполнить пункт 6.5.1.5.

6.5.5. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U(n)$ передачи в режиме работы на нагрузку $0,5Z_0$

6.5.5.1. Установить переключатель $S1$ в положение «5».

6.5.5.2. Выполнить пункт 6.5.3.2.

6.5.5.3. Выполнить пункт 6.5.1.5.

6.5.6. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U(n)$ передачи в режиме работы на емкостную нагрузку jX_C

6.5.6.1. Установить переключатель $S1$ в положение «6».

6.5.6.2. Выполнить пункт 6.5.1.5.

6.5.7. Измерение зависимости действующего значения напряжения $U(n)$ передачи в режиме работы на индуктивную нагрузку jX_L

6.5.7.1. Установить переключатель $S1$ в положение «7».

6.5.7.2. Выполнить пункт 6.5.1.5.

6.6. Обработка результатов измерений

6.6.1. Построить графики зависимости напряжения от номера гнезда n для всех режимов работы линии.

6.6.2. Рассчитать модуль комплексного коэффициента отражения $|\rho|$ и коэффициенты стоячей $K_{св}$ и бегущей волны $K_{бв}$ для исследуемых режимов работы. Результаты занести в таблицу 6.2.

6.6.3. Сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований.

Таблица 6.2 — Теоретические и экспериментальные параметры линии

Пара- ра- метр	Теоретические данные			Экспериментальные данные						
	Нагрузка Z_H			Нагрузка Z_H						
	∞	0	Z_0	∞	0	Z_0	$2Z_0$	$0,5Z_0$	jX	$-jX$
$ \rho $										
$K_{св}$										
$K_{бв}$										

6.7. Оформление отчета

6.7.1. Сформулировать цель работы.

6.7.2. Привести схему лабораторной установки.

6.7.3. Привести результаты предварительного расчета.

6.7.4. Привести таблицу с экспериментальными и теоретическими данными, а также графики полученных зависимостей на одном рисунке и в одном масштабе для всех исследуемых режимов работы линии.

6.8. Выводы

В выводах необходимо отметить следующее.

6.8.1. Сопоставить результаты расчетов и эксперимента.

6.8.2. Привести полученные значения модулей комплексного коэффициента отражения и $K_{св}$ исследуемых нагрузок.

6.9. Контрольные вопросы

6.9.1. В каких случаях линии передачи рассматривают как цепи с распределенными параметрами? Каковы особенности этих цепей?

6.9.2. Какими погонными параметрами характеризуются длинные линии? С какой скоростью распространяется электромагнитная волна вдоль линии передачи?

6.9.3. Режимы работы длинной линии. Записать выражения для распределения напряжений и токов в длинной линии.

6.9.4. Как определить время задержки искусственной линии, состоящей из n звеньев. Рассчитайте частоту f , при которой эта линия имеет геометрическую длину $l = \lambda$, где λ — длина волны в двухпроводной линии.

6.9.5. Дать определение волновому сопротивлению линии $\underline{Z}_0$. Как определяется $\underline{Z}_0$, если линия а) с потерями; б) без потерь?

6.9.6. Объяснить физический смысл коэффициента распространения $\underline{\gamma}$. Записать уравнения $\underline{\gamma}$ для линий а) с потерями; б) без потерь.

6.9.7. Дать определение комплексному коэффициенту отражения $\underline{\rho}$. В каких пределах могут изменяться модуль и аргумент $\underline{\rho}$?

6.9.8. Дать определения коэффициентов бегущей и стоячей волн. В каких пределах они изменяются?

6.9.9. При каких условиях в длинной линии образуются стоячие волны?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания «Лабораторный практикум по дисциплине «Основы теории цепей» для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / СевНТУ; Сост. В.Б. Салицкий, А.В. Лукьянчиков: Ч.1. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. — 74 с.
2. Попов В.П. Основы теории цепей / В.П. Попов. — М.: Высшая школа, 2007. — 576 с.
3. Основи теорії кіл: підруч. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом "Радіотехніка": у 2-х ч. Ч.2. / Ю.О. Коваль, Л.В. Гринченко, І.О. Милютченко, О.І. Рибін; Ред. В. М. Шокало. — Харьков: СМІТ, 2008. — 560 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники / Г.И. Атабеков. — М.: Энергия, 1978. — 420 с.
5. Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А.В. Нетушил, С. В. Страхов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
6. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.05.0901 — «Радиотехника» / В.Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — 20 с.

Заказ № _____ от «___» _____ 2012. Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ