

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Ульяновский государственный технический университет

**Методические указания к лабораторным работам  
по теоретическим основам электротехники  
Часть 2**

Составители: В. М. Петров  
М. К. Казаков  
С. А. Курганов  
Е. Н. Меньшов  
Я. Г. Бернштейн

**Ульяновск 2006**

**Федеральное агентство по образованию**  
**Государственное образовательное учреждение высшего**  
**профессионального образования**  
**Ульяновский государственный технический университет**

**Методические указания**  
**к лабораторным работам**  
**по теоретическим основам электротехники**  
**Часть 2**

**Ульяновск**

УДК 621.3 (076)

ББК 31.21 я7

М54

Рецензент доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета Ульяновского государственного технического университета В. Н. Дмитриев

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета университета.

**М54            Методические указания** к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники ч. 2 /сост. В. М. Петров, М. К. Казаков, С. А. Курганов, Е. Н. Меньшов, Я. Г. Бернштейн. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 24 с.

Данное руководство предназначено для студентов энергетического, радиотехнического и заочного факультетов, изучающих курсы «Теоретические основы электротехники» и «Основы теории цепей». В разработке методических указаний принимали участие: Петров В. М. (введение, работа № 3, редактирование), Казаков М. К., Бернштейн Я. Г. (работы № 1, № 2), Курганов С. А. и Меньшов Е. Н. (работы № 4, № 5), Бернштейн Я. Г. (лабораторное обеспечение). При разработке руководства учитывались предыдущие издания кафедры, а также аналогичные разработки других вузов. Работа подготовлена на кафедре «Электроснабжение» цикл ТОЭ и ОЭ.

**УДК 621.3 (076)**

**ББК 31.21 я7**

**М54**

© В. М. Петров, М. К. Казаков, С. А. Курганов,  
Е. Н. Меньшов, Я. Г. Бернштейн,  
составление, 2006

© Оформление. УлГТУ, 2006

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы являются одним из видов занятий для освоения дисциплины «Теоретические основы электротехники». Основными задачами лабораторных занятий являются: освоение техники электротехнического эксперимента, обучение грамотному оформлению результатов измерений, практическая проверка положений, изложенных в теоретической части курса. Приобретение навыков работы с персональным компьютером при исследовании и обработке результатов экспериментов. Лабораторные работы проводятся бригадами, в составе бригады не должно быть более трех студентов. Лаборатории кафедры позволяют проводить занятия фронтальным методом, поэтому можно установить наиболее целесообразную последовательность проведения работ с лекционными и практическими занятиями в соответствии с рабочей программой. Отчет по лабораторной работе составляет каждый студент. Для проведения следующей работы требуется сдача с защитой отчета по предыдущей работе. Только после сдачи отчета студент допускается к новой работе. В конце описания каждой лабораторной работы имеются контрольные вопросы, которые дают возможность студенту подготовиться к предстоящей работе.

## ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) для помещений без повышенной опасности поражения током, к которым относятся лаборатории теоретических основ электротехники, безопасным считается напряжение до 42 В. Сопротивление тела человека определяется главным образом сопротивлением кожного покрова и равно  $200 \div 500$  кОм. Увлажнение или повреждение кожи снижает сопротивление до  $600 \div 800$  Ом. Большое влияние оказывает также общее состояние организма и нервной системы. Таким образом, при указанном напряжении через человека, находящегося в нормальном состоянии, протекает ток в  $0,1 \div 0,3$  мА. Ток 50 мА может привести к травме, а в 100 мА – к смертельному исходу. Следует иметь в виду, что при токе даже менее 50 мА мышцы кистей рук непроизвольно сокращаются, а токоведущая часть может остаться зажатой в кулаке, тогда не удастся разжать руку и прервать прохождение тока через тело.

Основные правила по технике безопасности следующие.

1. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что выключатель стенда находится в отключенном состоянии.

2. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов, тумблеров и др.

3. Перед тем как присоединить конденсатор, его необходимо предварительно разрядить, замкнув выводы накоротко проводником.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может быть включена только по его разрешению.

5. Перед включением цепи следует убедиться, что никто не прикасается к оголенным токоведущим частям.

6. Все необходимые переключения нужно производить только при отключенном напряжении. Всякое изменение в цепи должно быть проверено преподавателем.

7. Студентам не разрешается самостоятельно производить какие-либо переключения на главном распределительном щите лаборатории.

8. Если во время работы возникает какое-либо повреждение, в результате которого появляется дым, специфический запах или накаляются провода, то надо быстро отключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся.

9. Если кто-либо попадает под напряжение и не сможет сам оторваться от токоведущих частей, то не пытайтесь оттащить его – вы сами будете поражены током. Быстро отключите напряжение. Сообщите преподавателю о случившемся.

10. Студенты допускаются к лабораторным работам после ознакомления с настоящими правилами, что фиксируется в специальном журнале под роспись.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

#### 1. Основные положения

Электротехническое оборудование, как правило, работает лучше при синусоидальном входном напряжении, и электрические станции вырабатывают именно такое напряжение. Но иногда, из-за влияния различных искажающих факторов, реальные токи и напряжения могут отличаться от синусоидальных. Кроме этого, несинусоидальные напряжения (прямоугольной, треугольной и других форм) широко используются в электронике. Поэтому необходимо уметь анализировать схемы при наличии в них таких токов и напряжений.

Если электрическая цепь является линейной (параметры ее элементов не зависят от времени, напряжения, тока), то для анализа процессов в такой цепи может использоваться гармонический метод, согласно которому периодическая несинусоидальная функция  $f(\omega t)$ , удовлетворяющая условиям Дирихле, может быть разложена в ряд Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{mk} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_{mk} \cos k\omega t, \quad (1.1)$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая;  $k = 1, 2, \dots$  – номер гармонической составляющей;  $\omega = 2\frac{\pi}{T}$  – частота основной (первой) гармоники;  $T$  – период функции  $f(\omega t)$ . Отметим, что постоянная составляющая иногда называется нулевой гармоникой.

Другая форма ряда Фурье имеет вид

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k). \quad (1.2)$$

Между выражениями (1.1) и (1.2) имеется связь:

$$A_{mk} = \sqrt{B_{mk}^2 + C_{mk}^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{C_{mk}}{B_{mk}}. \quad (1.3)$$

**Составляющая  $A_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k)$  называется гармоникой.** При  $k = 1$  мы имеем первую (основную) гармонику. Если аналитическое выражение функция  $f(\omega t)$  известно, то коэффициенты ряда (1.1) могут быть найдены по

формулам:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) dt; \quad B_{mk} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d(\omega t); \quad C_{mk} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d(\omega t). \quad (1.4)$$

Если аналитическое выражение функции  $f(\omega t)$  является сложным (или оно неизвестно), но известен график этой функции, то можно использовать графический метод определения коэффициентов ряда Фурье. Он основывается на разбиении графика функции на  $N$  интервалов (рис 1.1), определении значений функции в середине каждого интервала и замене интеграла суммой конечного числа слагаемых:

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N f_p(x); \quad B_{mk} = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N f_p(x) \sin kx_p; \quad C_{mk} = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N f_p(x) \cos kx_p, \quad (1.5)$$

где  $N$  – число интервалов  $\Delta x$ ;  $x_p$ ;  $f_p(x)$  – значения соответственно аргумента и функции в середине интервала  $p$  ( $p = 1, 2, 3, \dots$ );  $k$  – число гармоник.

Если функция  $f(\omega t)$  симметрична относительно оси абсцисс, то обычно используется ее разложение на протяжении половины периода.

После определения гармонических составляющих ряда Фурье можно использовать принцип наложения для расчета токов и напряжений в исходной схеме при воздействии заданного несинусоидального воздействия (это справедливо для линейной цепи).

Также отметим, что действующее значение несинусоидальной функции (1.2) определяется через действующие значения гармоник (включая нулевую) следующим образом:

$$F = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2}. \quad (1.6)$$

## 2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является ознакомление с методами исследования линейных электрических цепей под воздействием несинусоидальных токов и напряжений.

Задача 1. Получение несинусоидального напряжения с помощью лабораторного оборудования и проведение необходимых измерений.

Задача 2. Разложение полученной несинусоидальной кривой в ряд Фурье и проведение необходимых вычислений.

### 3. Последовательность выполнения работы

3.1. Собрать электрическую цепь согласно рис. 1 после определения сопротивления резистора  $R$  с помощью омметра. Источник несинусоидального напряжения представляет собой последовательно соединенные источник синусоидального напряжения и диод. Он расположен внутри стенда и имеет выходные зажимы 1 и 2. Частота входного напряжения равна 50 Гц.

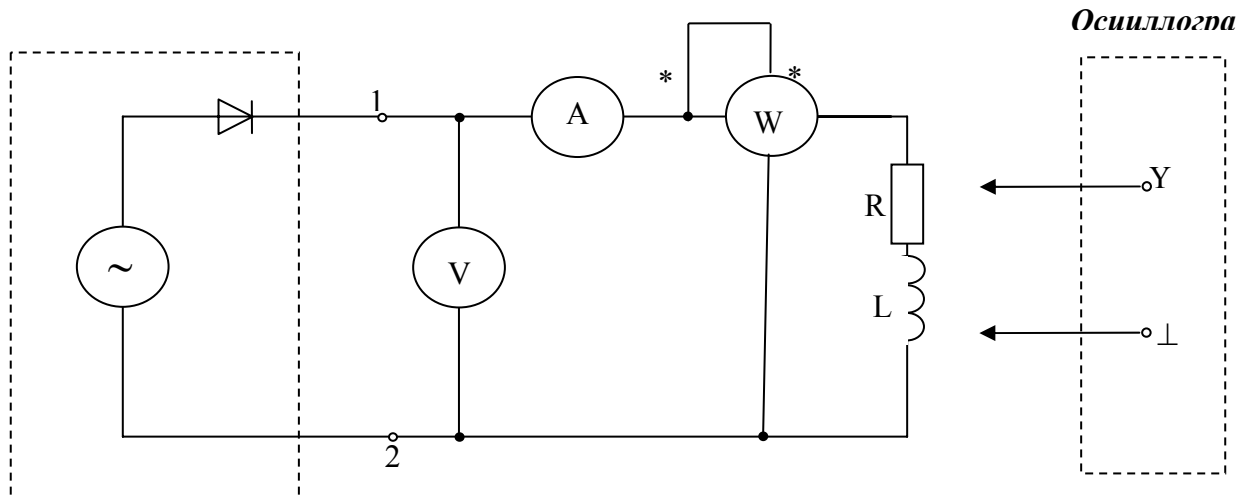


Рис. 1

3.2. Измерить следующие величины: активную мощность  $P$ ; действующее  $U_L$  и среднее  $U_{Lcp}$  значения напряжения на индуктивности (с помощью вольтметра), а также максимальное значение  $U_{Lm}$  этого напряжения и действующее значение тока  $I$  в цепи. Все результаты занести в таблицу 1.1.

3.3. Снять на кальку кривые выходного напряжения источника, напряжения на индуктивности и тока в цепи (осциллограмма тока снимается по напряжению на резисторе).

3.4. Используя результаты измерений, определить коэффициент амплитуды  $K_a = \frac{U_m}{U}$ , коэффициент формы  $K_\phi = \frac{U_L}{U_{Lcp}}$  для напряжения на катушке индуктивности. Результаты занести в таблицу 1.1.

**Примечание 1.** Действующее значение измеряется электронным вольтметром в режиме измерения переменного напряжения, а среднее – в режиме измерения постоянного напряжения. Поэтому при определении действующего значения необходимо иметь в виду, что вольтметр измеряет действующее значение только переменной составляющей, т. е. в формуле (1.6) отсутствует первое слагаемое, соответствующее нулевой гармонике  $A_0$ .

**Примечание 2.** При определении амплитудного значения напряжения можно воспользоваться осциллографом, но предварительно необходимо его отградуировать, подав на вход синусоидальное напряжение, что позволяет использовать простое соотношение



между амплитудным и действующим значениями напряжения (последнее измеряется вольтметром).

3.5. Разложить кривую напряжения на индуктивности в ряд Фурье. Ограничиться теми гармониками, амплитуды которых составляют 10 и более процентов от постоянной составляющей.

3.6. Рассчитать среднее значение напряжения  $U'_{Lcp}$ ; действующее значение напряжения  $U'_L$ , учитывая постоянную составляющую и первую гармонику; действующее значение напряжения  $U''_L$ , учитывая все рассчитанные гармоники. Результаты занести в таблицу 1.2.

3.7. Сравнить результаты вычислений по предыдущему пункту с экспериментальными данными. Определить при этом погрешности вычисления среднего значения  $\delta_{cp}$ , вычисления действующих значений  $U'_L$  (погрешность  $\delta$ ) и  $U''_L$  (погрешность  $\delta''$ ). Результаты занести в таблицу 1.2.

3.8. Рассчитать постоянную составляющую тока  $I_0$ ; активную мощность  $P_0$ , обусловленную постоянными составляющими напряжения и тока; полную мощность  $S$ . Результаты занести в таблицу 1.2.

3.9. Начертить кривую напряжения на индуктивности  $u(t)$  по ее ряду Фурье.

Таблица 1.1

$U_L, В$	$U_{Lcp}, В$	$U_{Lm}, В$	$P, Вт$	$I, А$	$K_a$	$K_\phi$

Таблица 1.2

$U'_{Lcp}, В$	$U'_L, В$	$U''_L, В$	$\delta_{cp}, \%$	$\delta', \%$	$\delta'', \%$	$I_0, А$	$P_0, Вт$	$S, В \cdot А$

4.1. Запишите две формы ряда Фурье и формулы, отражающие связь между ними.

4.2. Что означает термин «гармоника»?

4.3. Как можно рассчитать токи в линейной цепи при воздействии на ее вход несинусоидального напряжения?

4.4. Для цепи, схема которой приведена на рисунке ниже, найдите показание амперметра (он измеряет действующее значение тока) при следующих данных:  $u(t) = 100 + 80\sin(\omega t) + 40\sin(2\omega t) В$ ,  $R=10 \text{ Ом}$ ,  $C=100 \text{ мкФ}$ ,  $L= 0,1 \text{ Гн}$ ,  $f=50 \text{ Гц}$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

#### 1. Основные теоретические положения

В линейной электрической цепи, содержащей реактивные элементы, при переходе от одного режима к другому возникает переходный процесс, характер и длительность которого определяется топологией схемы и параметрами элементов. Токи и напряжения на участках цепи при переходном процессе изменяются не мгновенно, а по сложным законам.

Переходные процессы в линейных цепях описываются системой линейных интегро-дифференциальных уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Анализ переходных процессов сводится к решению этих дифференциальных уравнений и основывается на двух законах коммутации.

Первый закон коммутации утверждает, что в ветви электрической цепи с катушками индуктивности ток и магнитный поток не могут измениться скачком, в первый момент после коммутации они сохраняют те значения, которые имели до коммутации.

Согласно второму закону коммутации напряжение на обкладках конденсатора и его заряд не могут измениться скачком, в первый момент после коммутации они сохраняют те значения, которые имели до коммутации.

При подключении конденсатора  $C$  через резистор  $R$  к источнику постоянного напряжения  $U_0$  напряжение на обкладках конденсатора изменяется по показательному закону:

$$u_c(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (2.1)$$

а ток изменяется в соответствии с выражением:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2.2)$$

Произведение  $RC = \tau$ , имеющее размерность времени, называется **постоянной времени** и характеризует скорость переходного процесса. Через время  $t = \tau$  напряжение на конденсаторе возрастает до  $u_c = 0,63U_0$ , а ток уменьшается в  $e$  раз  $i = 0,37 I_0$ .

Цепь, состоящая из катушки индуктивности  $L$  и резистора  $R$ , при подключении к источнику постоянного напряжения ведет себя по-другому. Ток не может измениться мгновенно и нарастает по закону:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}), \quad (2.3)$$

а напряжение на катушке индуктивности убывает в соответствии с выражением:

$$u_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (2.4)$$

Скорость переходного процесса в такой цепи определяется постоянной времени  $\tau = \frac{L}{R}$ .

При подключении резистора, катушки индуктивности и конденсатора, соединенных последовательно, к источнику напряжения  $e(t)$ , переходный процесс описывается вторым законом Кирхгофа:

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt + u_c(0) = e(t), \quad (2.5)$$

где  $u_c(0)$  – напряжение на конденсаторе в начальный момент переходного процесса.

При разряде предварительно заряженного конденсатора на электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные резистор и катушку индуктивности, переходный процесс описывается уравнением:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i = 0. \quad (2.6)$$

Характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному (2.6), имеет вид:

$$P^2 + \frac{R}{L} \cdot P + \frac{1}{LC} = 0. \quad (2.7)$$

Корни характеристического уравнения (2.7)

$$P_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

(2.8)

могут быть вещественными, кратными или комплексно-сопряженными в зависимости от параметров элементов.

$$\text{При } \frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC} \quad \text{или} \quad R > 2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

(2.9)

корни характеристического уравнения будут вещественными, разными, отрицательными. **Такой процесс разряда конденсатора называется аperiodическим**, а его условие:

$$R > R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Решения дифференциального уравнения (2.6) запишутся в виде:

$$i(t) = \frac{u_c(0)}{L(P_2 - P_1)} \cdot (e^{P_1 t} - e^{P_2 t}),$$

(2.10)

$$i_c(t) = \frac{u_c(0)}{P_2 - P_1} \cdot (P_2 e^{P_1 t} - P_1 e^{P_2 t}),$$

(2.11)

$$i_L(t) = \frac{u_c(0)}{P_2 - P_1} \cdot (P_2 e^{P_1 t} - P_1 e^{P_2 t}).$$

(2.12)

При  $R < R_{кр}$  корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные, а **процесс разряда конденсатора называется колебательным, или периодическим**. Решения дифференциального уравнения при комплексно-сопряженных корнях имеют вид:

$$i(t) = \frac{u_c(0)}{\omega' L} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin \omega' t,$$

(2.13)

$$i_c(t) = -u_c(0) \cdot \frac{\omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega' t - \Theta),$$

(2.14)

$$i_L(t) = u_c(0) \cdot \frac{\omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega' t + \Theta),$$

(2.15)

где

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } \Theta = \arctg\left(\frac{\omega'}{-\beta}\right).$$

При  $R = R_{кр}$  получается предельный апериодический разряд, называемый критическим.

## 2. Цель и задачи лабораторной работы

Цель лабораторной работы – экспериментальное и теоретическое исследование переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами.

Задача работы – изучение характера переходных процессов в электрических цепях первого и второго порядков и влияния параметров элементов цепи на характер переходного процесса.

## 3. Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания (ИП)  $U_0$ , двухпозиционного электронного ключа (ЭК) и набора элементов. Постоянное напряжение необходимо измерять на клеммах 1-2. Набор элементов ( $R, L, C$ ) позволяет собрать цепь первого и второго порядков с различными параметрами, что дает возможность исследовать характер переходного процесса экспериментально – на экране осциллографа и теоретически – расчетом. Электронный ключ производит переключения конденсатора с частотой 50 Гц, таким образом, длительность периода «заряд – разряд» составляет 0,2 с.

## 4. Порядок выполнения работы

Собрать электрическую цепь первого порядка (рис. 2.1)  $R - C$  для исследования заряда и разряда конденсатора:  $u_c(f)$  заряд;  $i_c(f)$  заряд;  $u_c(f)$  разряд;  $i_c(f)$  разряд.

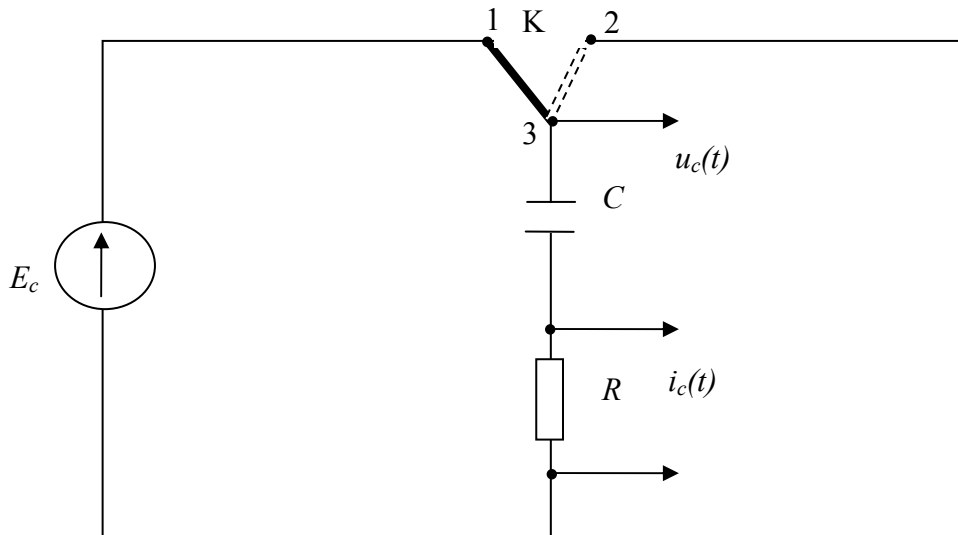


Рис. 2.1

Кривые изменения напряжения и тока снять на кальку. Провести расчет сигналов по заданным параметрам ( $R$ ,  $C$ ,  $E_0$ ,  $t_{pn}$ ).

$$\text{Заряд } u_c(f) = E_0(1 - e^{-\frac{1}{RC}f}), B; \quad i_c(f) = \frac{E_0}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC}f}, A.$$

$$\text{Разряд } u_c(f) = E_0 e^{-\frac{1}{RC}f}, B; \quad i_c(f) = -\frac{E_0}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC}f}, A.$$

2. Собрать электрическую цепь первого порядка (рис. 2.2)  $R - L$  для исследования включения и отключения цепи.

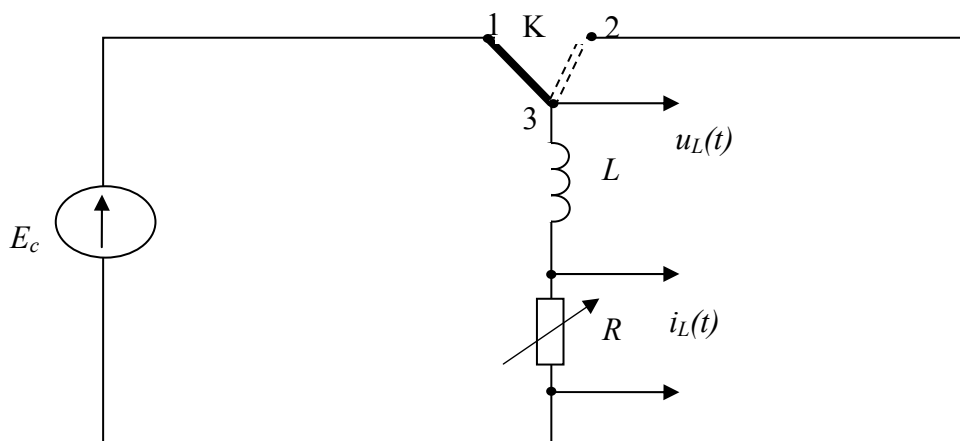


Рис. 2.2

Кривые изменения тока и напряжения:  $i_L(f)$  вкл.;  $u_L(f)$  вкл.;  $i_L(f)$  откл.;  $u_L(f)$  откл. снять на кальку. Провести расчет сигналов по заданным параметрам ( $R$ ,  $C$ ,  $E_0$ ,  $t_{ин}$ ).

Включение  $i_L(f) = \frac{E_0}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}f})$ , A;

$u_L(f) = E_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}f}$ , B.

Отключение  $i_L(f) = \frac{E_0}{R} e^{-\frac{R}{L}f}$ , A;

$u_L(f) = -E_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}f}$ , B;

$$t_m = \frac{4L}{R}.$$

4. Собрать электрическую цепь второго порядка (рис. 2.3)  $R - L - C$  для исследования аperiodического, критического и колебательного процессов.

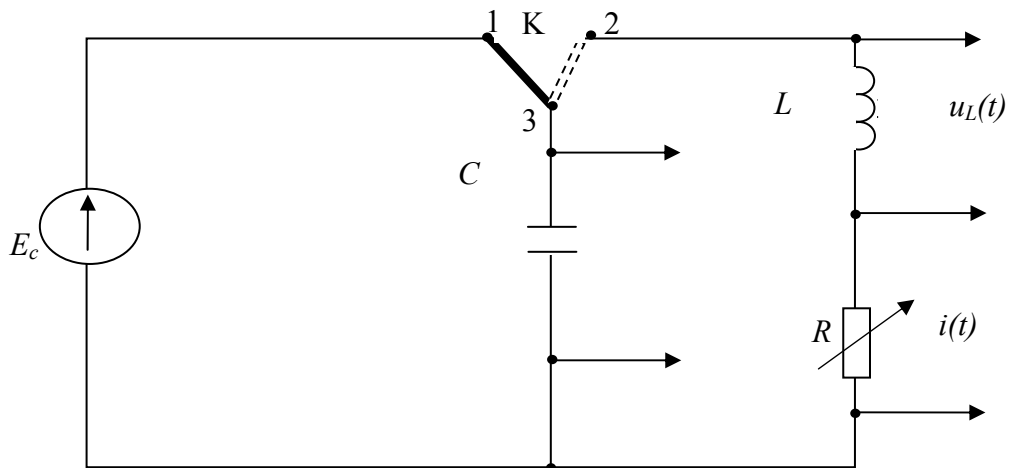


Рис. 2.3

Записать параметры элементов цепи ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ). Снять на кальку кривые изменения:  $u_c(f)$  аperiod.;  $u_c(f)$  критич.;  $u_c(f)$  колеб.;  $u_L(f)$  аperiod.;  $i(f)$  аperiod.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

##### 1. Основные теоретические положения

Четырехполусником называется часть электрической цепи, имеющая два входных 1–1' (рис. 3.1), а два выходных 2–2' зажима. Если четырехполусник не содержит источников электрической энергии, а элементы схемы линейные, то такие **четыреполусники называются пассивными и линейными.**

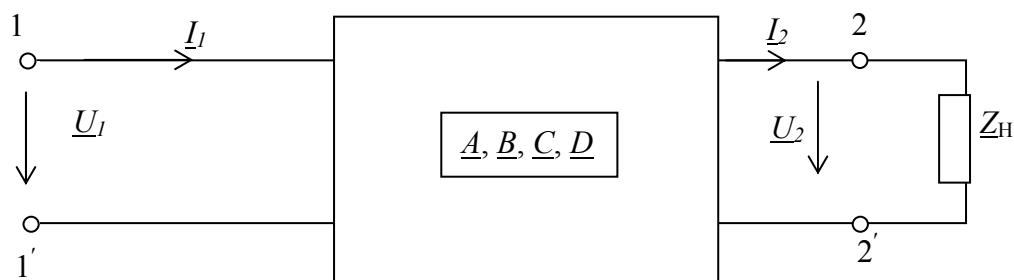


Рис. 3.1

Для любого пассивного линейного четырехполюсника напряжение и ток на входе  $\underline{U}_1, \underline{I}_1$  связан с напряжением и током на выходе  $\underline{U}_2, \underline{I}_2$  уравнениями четырехполюсника в различных формах.

Форма  $A$  [1.2]:

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2,$$

(3.1)

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2,$$

где  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$  – комплексные коэффициенты, зависящие от параметров элементов и внутренних соединений четырехполюсника.

Коэффициенты четырехполюсника связаны между собой зависимостью:

$$\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1.$$

(3.2)

Если источник питания подключить к выходным зажимам четырехполюсника (рис. 3.1), то направления токов в ветвях меняются на противоположные, и система уравнений получает вид

$$\underline{U}_2 = \underline{D} \cdot \underline{U}_1 + \underline{B} \cdot \underline{I}_1,$$

(3.3)

$$\underline{I}_2 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{A} \cdot \underline{I}_1.$$

Коэффициенты четырехполюсника могут определяться либо расчетным путем, если известны параметры элементов и схема соединения четырехполюсника, либо экспериментальным путем по данным опытов холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{Z}_{10} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{I}_{10}} = \underline{Z}_{10} \cdot e^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}},$$



где 
$$\underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}, \quad \varphi_{10} = \arccos \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}};$$

$$\underline{Z}_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} = \underline{Z}_{1K} \cdot e^{j\varphi_{1K}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}},$$

(3.4)

где 
$$\underline{Z}_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}, \quad \varphi_{1K} = \arccos \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}};$$

$$\underline{Z}_{2K} = \frac{U_{21K}}{I_{2K}} = \underline{Z}_{2K} \cdot e^{j\varphi_{21K}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}},$$

где 
$$\underline{Z}_{2K} = \frac{U_{2K}}{I_{2K}}, \quad \varphi_{21K} = \arccos \frac{P_{2K}}{U_{21K} \cdot I_{2K}}.$$

В формулах (3.4) нижние индексы  $0$  и  $K$  означают принадлежность величины к опытам соответственно холостого хода и короткого замыкания.

С помощью соотношений (3.4) и зависимости (3.2) можно определить коэффициенты четырехполюсника:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10} \cdot \underline{Z}_{1K}}{\underline{Z}_{2K} (\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1K})}}, \quad \underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2K}, \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{10}}, \quad \underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1K}}.$$

(3.5)

Пассивный линейный четырехполюсник можно заменить Т- или П-образной схемой замещения (рис. 3.2 а, б).

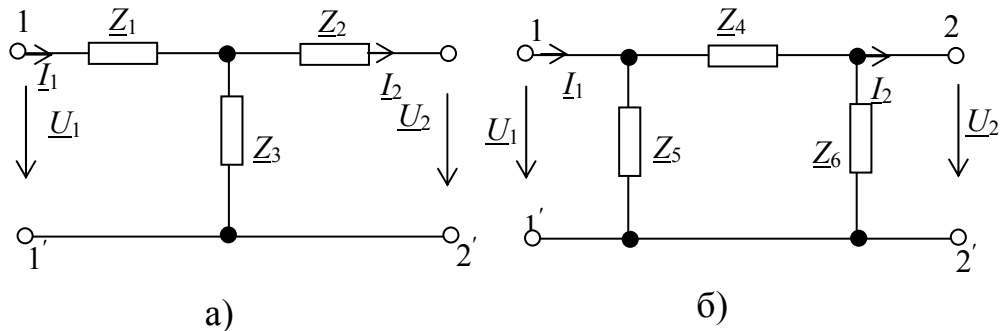


Рис. 3.2

Параметры схем замещения выражаются через коэффициенты соотношениями [3]:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}, \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{C}},$$

(3.6)

$$\underline{Z}_4 = \underline{B}, \quad \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1}, \quad \underline{Z}_6 = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}.$$

## 2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является знакомство с элементом электрических цепей – четырехполюсником, опытное определение коэффициентов четырехполюсника и параметров схем замещения, расчет и экспериментальная проверка величин на выходе в рабочем режиме.

## 3. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему электрической цепи (рис.3.3).

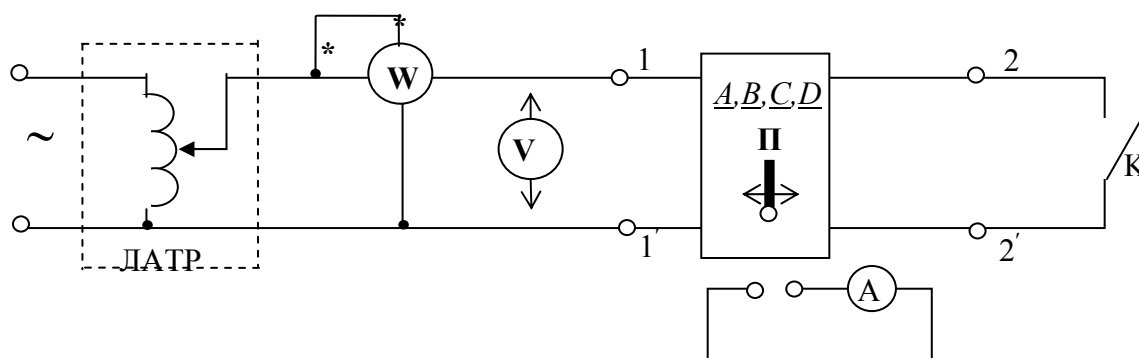


Рис. 3.3

**Примечание.** Специальный ключ  $\Pi$  позволяет одним амперметром измерять ток в зависимости от положения тумблера на первичной или вторичной стороне четырехполюсника. ЛАТР – лабораторный автотрансформатор.

2. Провести опыты холостого хода (ключ К разомкнут) и короткого замыкания (ключ К замкнут) при прямом питании.

3. На схеме (рис. 3.3) поменять местами входные (1-1') и выходные (2-2') зажимы и произвести опыты холостого хода и короткого замыкания при «обратном» питании.

4. Собрать схему (рис. 3.4).

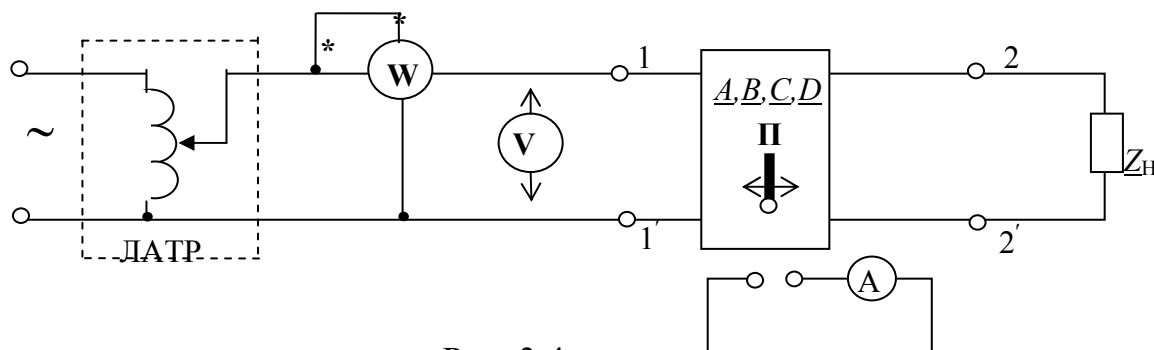


Рис. 3.4

5. Провести запись показаний приборов для режима, заданного преподавателем

6. Запись результатов измерений производить в таблице 3.1.

Таблица 3.1

№	Опыт	Измерено					Вычислено	
		$U_1, В$	$I_1, А$	$P, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$Z, Ом$	$\varphi, град$
1	Пр ХХ							
2	Пр КЗ							
3	Обр ХХ							
4	Обр КЗ							
5	Общий случай							

#### 4. Работа над отчетом

1. Записать цель и задачи лабораторной работы.
2. Начертить электрические цепи рис. 3.3 и рис. 3.4.
3. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 3.1.
4. Вычислить комплексные сопротивления  $\underline{Z}_{10}, \underline{Z}_{1K}, \underline{Z}_{2K}$  и занести в таблицу.

**Примечание.** При записи комплексных сопротивлений учесть, что цепь внутренней схемы четырехполюсника выполнена на конденсаторах, и угол  $\varphi$  отрицателен.

5. Вычислить коэффициенты четырехполюсника по формулам (3.5).
6. Провести проверку расчета по уравнению (3.2).
7. Воспользовавшись найденными значениями коэффициентов и выходными данными  $U_2$  и  $I_2$  из опыта пп. 4–5 по уравнениям четырехполюсника, вычислить напряжение и ток на входе  $U_1$  и  $I_1$ .  
Результат расчета сопоставить с экспериментальными данными. Следует учесть, что ток  $I_2$  опережает напряжение  $U_2$  при активно-емкостной схеме четырехполюсника и нагрузки.
8. Рассчитать параметры Т- и П-образных схем замещения через коэффициенты четырехполюсника.
9. Сделать выводы по проделанной работе.

#### 5. Контрольные вопросы

1. Определить параметры коэффициентов для четырехполюсника на рис. 3.5.

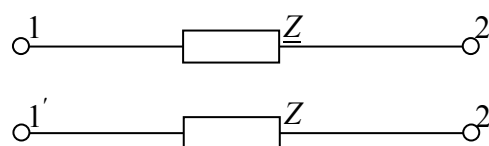


Рис. 3.5

2. Определить комплексное входное сопротивление четырехполюсника при прямом питании в режиме холостого хода и короткого замыкания, схема которого приведена на рис. 3.6.

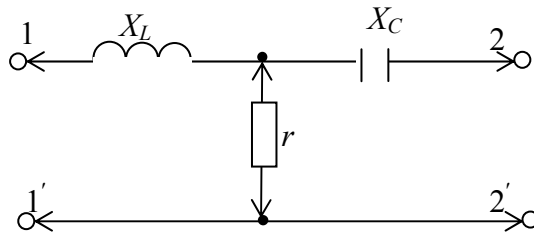


Рис. 3.6

3. Выразить параметры Т- и П-образной схемы замещения через коэффициенты четырехполюсника.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

#### 1. Основные теоретические положения

В работе исследуется Т-образный фильтр нижних частот типа К, схема которого представлена на рис. 4.1.

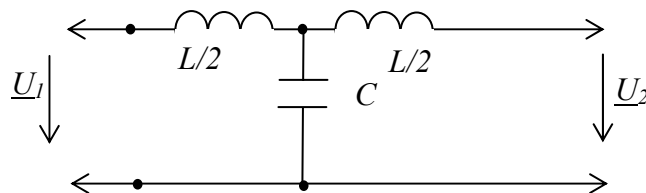


Рис. 4.1

Структура фильтра симметричная: каждое плечо схемы обладает индуктивностью  $\frac{L}{2}$ . Характеристики фильтра и формулы для их определения приведены ниже [4]:

– частота среза  $f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{L \cdot C}}$ ;

(4.1)

– характеристическое сопротивление  $Z_c = R_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$ ;

(4.2)

– номинальное характеристическое сопротивление  $R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ;

(4.3)

– комплексный коэффициент передачи по напряжению

$$\underline{K}_U = \frac{U_2}{U_1} = K_{Ue^{j\varphi_K}};$$

(4.4)

– комплексный коэффициент ослабления напряжения

$$\underline{A} = \frac{U_1}{U_2} = A e^{j\varphi_A} = \frac{1}{\underline{K}_U};$$

(4.5)

– амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента передачи

$$K_U = \frac{U_2}{U_1};$$

(4.6)

– фазочастотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи

$$\varphi_K = \psi_{U_2} - \psi_{U_1};$$

(4.7)

– АЧХ коэффициента ослабления  $A = \frac{U_1}{U_2}$ ;  $A(\text{Нп}) = \ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)$ ;

$$A(\text{дБ}) = 20 \ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right);$$

$$A(\text{дБ}) = 8,68 A(\text{Нп});$$

$$A(\text{Нп}) = 0,115 A(\text{дБ});$$

– ФЧХ коэффициента ослабления  $\varphi_A = \varphi_{U_1} - \varphi_{U_2} = \varphi_K$ ;

(4.9) – АЧХ коэффициента ослабления при согласованном режиме

$$A(f) = \operatorname{arccch}\left(2\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1\right);$$

(4.10) – ФЧХ коэффициента ослабления при согласованном режиме

$$\varphi_A(f) = \begin{cases} \arccos\left(1 - 2\left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) \\ \text{при } f \leq f_c \\ 180^\circ \text{ (или } \pi) \text{ при } f > f_c; \end{cases}$$

(4.11) – операторный коэффициент передачи при резистивной нагрузке

$$K_U(p) = \frac{a_0}{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0};$$

$$a_0 = 4; b_0 = 4; b_4 = \frac{4L}{R_H};$$

$$b_2 = 2CL; b_3 = \frac{CL^2}{R_H}.$$

(4.12)

Экспериментальные АЧХ фильтра  $K_U(f)$ ,  $A(f)$  определяются путем измерения входного и выходного напряжения фильтра при гармоническом воздействии в заданном диапазоне частот с последующим использованием формул (4.6), (4.8).

## 2. Цель и задачи лабораторной работы

Цель работы: исследовать основные режимы работы Т-образного фильтра нижних частот типа  $K$  и сопоставить математические модели с характеристиками реального фильтра.

Задачи:

- рассчитать частоту среза  $f_c$  и номинальное характеристическое сопротивление  $R_0$  выданного преподавателем фильтра;

- снять экспериментальным путем АЧХ коэффициента затухания фильтра в полосе пропускания при согласованной нагрузке, данные

представить в двух единицах измерения: неперах и децибелах,

- получить экспериментально АЧХ коэффициента передачи  $K_U$  и коэффициент затухания  $A$  в широком диапазоне частот при сопротивлении нагрузки  $R_H$ , равном номинальному характеристическому сопротивлению  $R_0$ ;

- рассчитать теоретические АЧХ и ФЧХ коэффициента затухания исследуемого фильтра при идеальной – согласованной нагрузке в широком диапазоне частот, построить графики, нанести на них экспериментальные точки;

- сделать выводы по работе.

## 5. Порядок выполнения работы

1. Получите у преподавателя значения  $L$  и  $C$ .
2. Рассчитайте по формуле (4.1) частоту среза  $f_c$  фильтра.
3. Соберите цепь для снятия АЧХ фильтра, представленную на рис. 4.2.

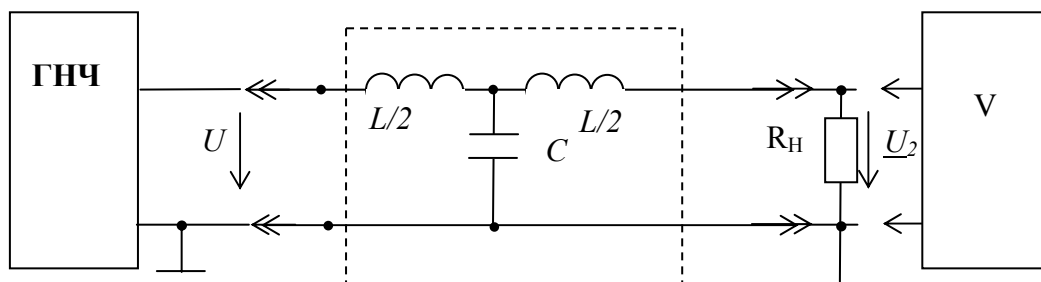


Рис. 4.2

Обозначения: ГНЧ – генератор низких частот;  $V$  – вольтметр; пунктиром выделен исследуемый фильтр.

4. Снимите экспериментальные АЧХ коэффициента ослабления фильтра при согласованном режиме  $R_H = Z_C$ . Для получения АЧХ достаточно измерить напряжение  $U_1$  и  $U_2$  при заданных частотах входного воздействия. Данные занести в таблицу 4.1. Характеристические сопротивления рассчитайте до проведения эксперимента по формулам (4.2), (4.3).

Таблица 4.1

Задано	$f/f_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Расчет	$f$ , кГц									
	$Z_c$ , Ом									
Измерения	$U_1$ , В									
	$U_2$ , В									
Расчет	$A$									
	$A$ , Нп									
	$A$ , дБ									

5. Получите экспериментально АЧХ фильтра при сопротивлении нагрузки, равном характеристическому сопротивлению. Для этого используйте схему на рис. 4.2 при  $R_H = R_0$ . Данные занесите в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Задано	$f/f_c$	0.1	0.3	0.5	0.7	1	3	5	7
	$f$ , кГц								
Измерено	$U_1$ , В								
	$U_2$ , В								
Рассчитано (4.8)	$K_U$								
	$A$								

	$A, \text{Нп}$								
--	----------------	--	--	--	--	--	--	--	--

### 5. Работа над отчетом

1. Расчет теоретических АЧХ и ФЧХ фильтра при согласованной нагрузке проведите по формулам (4.10) и (4.11). Результаты занесите в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

$f / f_c$	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1	3	5	7
$A, \text{Нп}$									
$\varphi_k, \text{град}$ (рад)									

2. Получите теоретические АЧХ и ФЧХ фильтра при  $R_H = R_0$ . Результаты занесите в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

$f / f_c$	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1	3	5	7	10
$K_U$										
$\varphi_k, \text{град}$ (рад)										

### 5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение фильтра типа  $K$ .
2. В чем проблема согласования фильтра типа  $K$  с нагрузкой?
3. Какую форму имеет АЧХ коэффициента передачи фильтра на холостом ходу?
4. Как влияет сопротивление нагрузки на форму АЧХ коэффициента передачи фильтра?



## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет выполняется чернильной пастой черного или синего цвета на двойном тетрадном листе каждым студентом.

Все схемы должны быть выполнены согласно стандартным обозначениям, вычерчены с применением необходимых чертежных принадлежностей.

Графики должны выполняться на миллиметровой бумаге того же формата, что и пояснительная записка. Для построения графика все расчетные и экспериментальные точки отчетливо отмечаются кружочками, точками и т.д. Векторные диаграммы, строящиеся по опытным данным, выполняются в масштабе, который указывается рядом с диаграммой.

Выбор масштаба графиков заключается в следующем:

– выбор поля графика, при этом экспериментальные точки не должны выходить за поле;

– масштаб должен быть простым, желательно десятичным, так как другие затрудняют подсчеты и построение.

Надписи на схемах и заполнение таблиц производится чернильной пастой.

Отчет заканчивается краткими выводами, в которых излагают основные результаты работы, проводят сравнение опытных и расчетных данных, анализируют полученные характерные зависимости и причины их обуславливающие.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демирчян, К. С., Нейман, Л. Р., Коровкин, Н. В., Чечурин, В. Л. Теоретические основы электротехники т. 1, 2 /К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин – 4-е изд., дополненное для самостоятельного изучения курса. – М.–Л.: Изд-во «Питер», 2003.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники /Л. А. Бессонов. –10-е изд. – М.: Гардарики, 2001. – 638 с.
3. Сборник задач по теоретическим основам электротехники /под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982.
4. Сборник задач по теоретическим основам электротехники /под ред. Л. А. Бессонова. – М.: Энергоиздат, 1988.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Основные правила безопасной работы в электротехнической лаборатории .....	3
Лабораторная работа № 1 НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ .....	5
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ .....	9
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ .....	14
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ .....	19
ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА .....	24
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	25

Учебное издание

**Методические указания**  
к лабораторным работам  
по теоретическим основам электротехники  
Часть 2  
Составители: **Петров** Валерий Максимович  
**Казаков** Михаил Константинович  
**Курганов** Сергей Александрович и др.

Редактор Н.А. Евдокимова

Подписано в печать 30.09. 2006. Формат 60x84/16.  
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл.печ.л. 1,40  
Уч.-изд. л. 1,0 Тираж 150 экз. Заказ

Ульяновский государственный технический университет  
432027, Ульяновск, Сев.Венец, 32.

Типография УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев.Венец, 32.