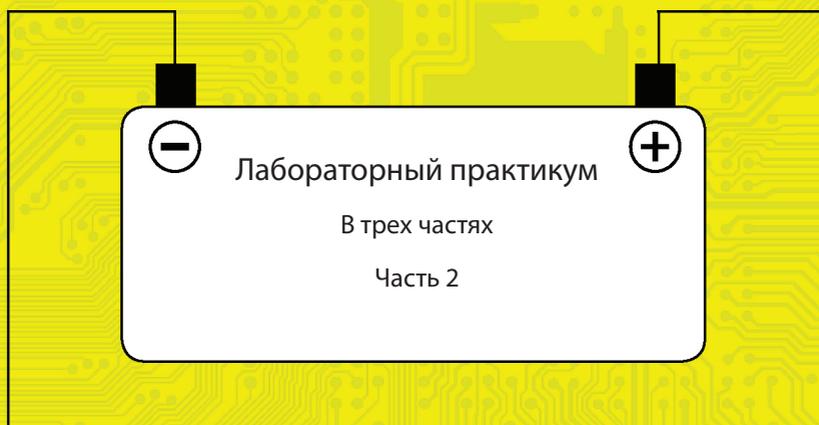


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт химии и энергетики

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2020

ISBN 978-5-8259-1549-4

УДК 621.3.01

ББК 31.211

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Самарского государственного  
технического университета *В.Н. Козловский*;

д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного  
университета *В.В. Вахнина*.

Авторы:

С.В. Шлыков, Н.В. Шаврина (ч. 1, 2); Д.А. Нагаев (ч. 3).

Теоретические основы электротехники : лабораторный практикум.  
В 3 частях / С.В. Шлыков, Н.В. Шаврина, Д.А. Нагаев. – Тольятти :  
Изд-во ТГУ, 2020. – ISBN 978-5-8259-1551-7.

Ч. 2 / С.В. Шлыков, Н.В. Шаврина. – 1 оптический диск. –  
ISBN 978-5-8259-1549-4.

В практикуме представлены методические указания к выполнению лабораторных работ по учебному курсу «Теоретические основы электротехники 2». Практикум содержит программу выполнения лабораторных работ, пакет заданий индивидуальной расчетной части, требования к оформлению отчета, а также описание блоков учебного комплекта лабораторного оборудования «Электрические и магнитные цепи».

Предназначен для студентов очной формы обучения по направлениям подготовки бакалавра 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2020

Редактор *О.И. Елисеева*  
Технический редактор *Н.П. Крюкова*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 23.11.2020.

Объем издания 10 Мб.

Комплектация издания:

компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-38-19.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,  
тел. 8 (8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

Введение .....	5
Правила внутреннего распорядка и техники безопасности при выполнении лабораторных работ .....	6
Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ .....	8
Лабораторная работа 1. Исследование нелинейных электрических цепей постоянного тока .....	10
Лабораторная работа 2. Исследование нелинейной индуктивности и явления феррорезонанса .....	21
Лабораторная работа 3. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с одним реактивным элементом .....	36
Лабораторная работа 4. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с двумя реактивными элементами .....	44
Лабораторная работа 5. Исследование пассивных четырёхполюсников .....	52
Лабораторная работа 6. Исследование распределения напряжения вдоль однородной длинной линии .....	59
Библиографический список .....	67
Приложение 1 .....	68
Приложение 2 .....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» относится к базовой части профессионального цикла дисциплин и базируется на таких дисциплинах, как «Высшая математика» и «Физика».

Цель дисциплины состоит в изучении электромагнитных явлений в цепях, представленных идеализированными элементами схем замещения, при различных воздействиях и режимах.

В ходе изучения учебного курса «Теоретические основы электротехники 2» перед студентами ставятся следующие задачи:

- 1) ознакомиться с терминологией и символикой теории линейных электрических цепей;
- 2) научиться способам записи уравнений состояния элементов и участков цепей, основным методам расчета, анализа и синтеза линейных электрических цепей с использованием схем замещения;
- 3) получить практические навыки в работе с электронными и электрическими устройствами и оборудованием;
- 4) развить творческие способности, активизировать свою познавательную деятельность;
- 5) узнать методы проведения эксперимента и обработки результатов измерений при выполнении физического эксперимента.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны:

- убедиться в правильности теоретических положений, рассмотренных на лекционных занятиях, повторить и закрепить теоретический материал этих занятий;
- получить практический опыт чтения и сборки электрических схем, а также работы с электрооборудованием;
- научиться снимать показания электроизмерительных приборов, обрабатывать полученные данные и на их основе делать выводы о характере исследуемых процессов;
- на основе составления отчетов по лабораторным работам получить навыки оформления электротехнической документации;
- получить практические навыки по управлению электрическим оборудованием и технике безопасности при работе с ним.

При работе в лаборатории во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования студент должен строго выполнять следующие правила.

## **ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Приступая к работе в лаборатории, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. После ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписаться в соответствующем журнале.

3. Во время работы на лабораторных стендах не должно быть никаких лишних предметов, не используемых в схемах проводов и приборов.

4. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому.

5. Приступая к работе в лаборатории, студенческая группа делится на бригады по 3 человека, которые затем распределяются по лабораторным стендам.

6. Монтаж схем необходимо вести при отключенном питании лабораторного стенда в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме.

7. При сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались петлями. Приборы и электрооборудование расставляются так, чтобы было удобно ими пользоваться.

8. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю или учебному мастеру.

9. Включение электрической цепи под напряжение (после проверки) производится только с разрешения и в присутствии преподавателя или учебного мастера.

10. Перед включением напряжения следует предупредить об этом всех участников работы. Необходимо убедиться, что никому из них не угрожает опасность попасть под напряжение.

11. Переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания.

12. Запрещается прикасаться пальцами, карандашами и другими предметами к оголенным токоведущим частям электрической цепи, находящимся под напряжением.

13. Во время работы на лабораторных стендах запрещается отходить от приборов и оборудования, находящихся под напряжением.

14. Запрещается без разрешения преподавателя или учебного мастера переносить приборы с одного места на другое и трогать оборудование, не используемое в данной работе.

15. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, могущий быть причиной поражения электрическим током.

16. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

17. При обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю или учебному мастеру.

18. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания. При потере сознания и остановке дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### *Подготовка к лабораторным работам*

Каждая лабораторная работа выполняется в течение четырех академических часов. Лабораторные занятия проводятся фронтальным методом, т. е. студенты учебной группы выполняют одновременно одну и ту же работу.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- 1) предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;
- 2) ознакомиться с описанием лабораторной работы, установить, в чем состоит основная цель и задача работы;
- 3) выполнить индивидуальную расчетную часть и изучить теоретический материал, относящийся к данной лабораторной работе;
- 4) подготовить бланк отчета по лабораторной работе (прил. 1), который должен содержать описание цели работы, программу работы, электрическую схему исследуемой цепи, индивидуальную расчетную часть, необходимые таблицы и расчетные формулы.

Не подготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются!

Задание для подготовки лабораторной работы и оформление отчета выполняются самостоятельно во внеаудиторное время. Образец оформления протокола имеется на стенде в лаборатории.

### *Выполнение лабораторных работ*

Преподаватель допускает студентов к выполнению лабораторной работы после проверки выполнения индивидуальной расчетной части, знаний теоретического материала и порядка выполнения лабораторной работы, при наличии бланка отчета.

В работе используется комплект лабораторного оборудования «Электрические и магнитные цепи» (прил. 2).

Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые сначала последовательно, а затем параллельно. По окончании сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжением

можно только с разрешения преподавателя или учебного мастера. Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро. Результаты опыта предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только с разрешения преподавателя при отключенном напряжении питания. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

### ***Оформление отчета по лабораторным работам***

Отчет по лабораторной работе оформляется индивидуально каждым студентом, выполнившим необходимые эксперименты, независимо от того, выполнялся эксперимент индивидуально или в составе группы. Отчет по лабораторной работе должен содержать описание цели работы, программу работы, электрическую схему исследуемой цепи, индивидуальную расчетную часть, результаты эксперимента (таблицы данных, графики экспериментальных зависимостей, результаты обработки эксперимента и т. д.), выводы по работе. Все графические материалы (рисунки, чертежи, графики, схемы и т. д.) должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД. При оформлении отчета по лабораторной работе следует руководствоваться требованиями ГОСТ 7.32-2017 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

# Лабораторная работа 1

## Исследование нелинейных электрических цепей постоянного тока

**Цель работы** – изучение экспериментальных и графических методов анализа электрических цепей с нелинейными элементами.

### Программа работы

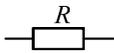
1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Экспериментально исследовать нелинейную электрическую цепь по вольт-амперным характеристикам её элементов.
3. Графическим методом получить эквивалентную вольт-амперную характеристику (ВАХ) электрической цепи.

### Описание лабораторной установки

В данной работе экспериментально снимаются вольт-амперные характеристики нелинейных элементов (табл. 1.1) электрической цепи.

Таблица 1.1

Исследуемые нелинейные элементы

№	Нелинейный элемент	Параметры	Условно-графическое обозначение
1	Резистор	$R = 47 \text{ Ом},$ $P = 2 \text{ Вт}$	
2	Лампа накаливания	$U = 10 \text{ В},$ $I = 55 \text{ мА}$	
3	Полупроводниковый стабилитрон	КС456В, $U_{\text{СТ}} = 5,6 \text{ В},$ $I_{\text{НОМ}} = 100 \text{ мА}$	
4	Полупроводниковый диод	КД226, $I_{\text{НОМ}} = 1,5 \text{ А}$	

Принципиальная схема (рис. 1.1) для снятия ВАХ исследуемых элементов состоит:

- из регулируемого источника постоянного напряжения от  $-13$  до  $+13$  В;
- ограничительного резистора  $R_{\text{огр}}$ , установленного для ограничения тока в цепи при малых сопротивлениях исследуемых элементов ( $47 \dots 220$  Ом);
- измерительных приборов (амперметр, вольтметр), расположенных на блоке мультиметров;
- исследуемого нелинейного элемента (НЭ).

На рис. 1.1, *а*, изображена электрическая схема измерения с погрешностью по напряжению. На практике она применяется для измерений больших сопротивлений, когда сопротивление исследуемого элемента сравнимо с внутренним сопротивлением вольтметра ( $R_{\text{НЭ}} \approx R_V$ ). Показание вольтметра близко к напряжению на нелинейном элементе.

На рис. 1.1, *б*, изображена электрическая схема измерения с погрешностью по току. На практике она применяется для измерений малых сопротивлений, когда сопротивление исследуемого элемента сравнимо с внутренним сопротивлением амперметра ( $R_{\text{НЭ}} \approx R_A$ ). Показание амперметра близко к току нелинейного элемента.

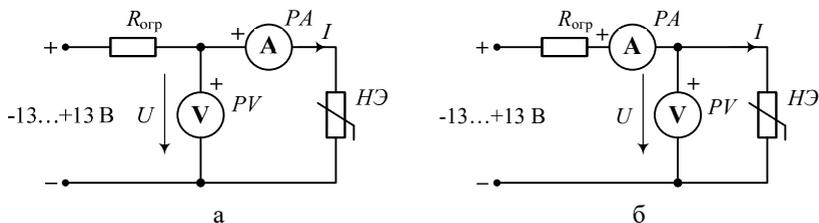


Рис. 1.1. Схема для снятия ВАХ исследуемого нелинейного элемента:  
*а* – с погрешностью по напряжению; *б* – с погрешностью по току

В данной лабораторной работе схема измерения с погрешностью по напряжению применяется для снятия ВАХ нелинейных элементов:

- резистора;
- лампы накаливания;

- обратной ветви полупроводникового диода;
- рабочей ветви полупроводникового стабилитрона.

Схема измерения с погрешностью по току применяется для снятия ВАХ:

- прямой ветви полупроводникового диода;
- прямой ветви полупроводникового стабилитрона.

Для изучения графического метода расчета исследуется разветвленная нелинейная электрическая цепь (табл. 1.2). Номер схемы соответствует номеру варианта.

Таблица 1.2

Конфигурация исследуемой нелинейной электрической цепи

Номер схемы	Разветвленная электрическая цепь с нелинейными элементами	Примечание
1		$R1 - 47 \text{ Ом}$ $R2 - 330 \text{ Ом}$ $VD - \text{КС456В}$
2		$R1 - 47 \text{ Ом}$ $R2 - 220 \text{ Ом}$ $VD - \text{КС456В}$
3		$R1 - 47 \text{ Ом}$ $VD - \text{КС456В}$
4		$R1 - 220 \text{ Ом}$ $R2 - 47 \text{ Ом}$ $VD - \text{КС456В}$

Но- мер схемы	Разветвленная электрическая цепь с нелинейными элементами	Примечание
5		$R1 - 220 \text{ Ом}$ $R2 - 47 \text{ Ом}$ $VD - \text{КC456B}$
6		$R - 47 \text{ Ом}$ $VD - \text{КC456B}$
7		$R1 - 47 \text{ Ом}$ $VD1 - \text{КC456B}$ $VD2 - \text{КД226}$
8		$R1 - 47 \text{ Ом}$ $VD1 - \text{КC456B}$ $VD2 - \text{КД226}$

### Пояснения к выполнению индивидуальной расчетной части

Нелинейные электрические цепи постоянного тока содержат нелинейные сопротивления. Свойства нелинейного сопротивления могут быть охарактеризованы либо его вольт-амперной характеристикой (ВАХ), либо зависимостями его статического и дифференциального сопротивлений от тока (напряжения).

Для нелинейного сопротивления в каждой точке вольт-амперной характеристики можно найти два его значения: статическое и дифференциальное.

Статическое сопротивление характеризует поведение нелинейного сопротивления в режиме неизменного тока. Оно равно отношению напряжения на нелинейном сопротивлении к протекающему по нему току:

$$R_{\text{ст}} = \frac{U}{I}.$$

Сопротивление  $R_{\text{ст}}$  численно равно тангенсу угла  $\alpha$  между осью ординат и прямой (рис. 1.2), идущей в точку  $A$ , умноженному на отношение масштабов по осям:

$$R_{\text{ст}} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha.$$

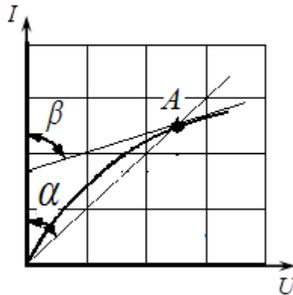


Рис. 1.2. Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента

Под дифференциальным сопротивлением принято понимать отношение малого приращения напряжения  $dU$  на нелинейном сопротивлении к соответствующему приращению тока  $dI$ :

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}.$$

Дифференциальное сопротивление (рис. 1.2) численно равно тангенсу угла  $\beta$  наклона касательной к ВАХ в рабочей точке  $A$ , умноженному на отношение масштабов по осям:

$$R_{\text{диф}} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \beta.$$

Величины статического и дифференциального сопротивлений зависят от положения рабочей точки на вольт-амперной характеристике. Статическое сопротивление всегда положительно, а дифференциальное может быть положительным и отрицательным. Дифференциальное сопротивление отрицательно на падающих участках вольт-амперных характеристик, когда  $\beta > 90^\circ$  и, следовательно,  $\text{tg } \beta < 0$ .

Расчет нелинейных цепей постоянного тока производят, как правило, графически. До проведения расчета должны быть известны вольт-амперные характеристики входящих в схему нелинейных сопротивлений. ВАХ могут быть заданы графиком, таблицей или математической формулой.

На рис. 1.3, а, изображена схема последовательного соединения нелинейных сопротивлений и их вольт-амперные характеристики. Требуется найти значение тока в цепи при заданном напряжении  $U$  и напряжение на каждом сопротивлении.

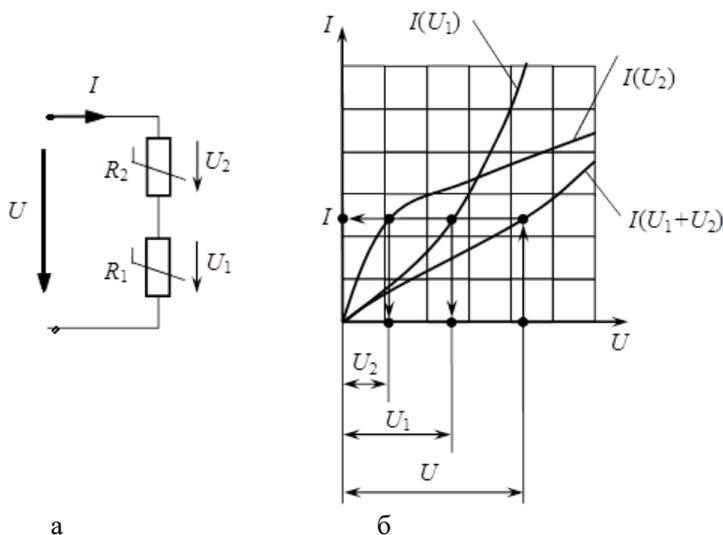


Рис. 1.3. Электрическая цепь с последовательным соединением нелинейных элементов (а) и ее ВАХ (б)

Построим эквивалентную ВАХ  $I(U_1 + U_2)$  для известных ВАХ последовательно соединенных нелинейных элементов (рис. 1.3, б).

Так как по обоим сопротивлениям протекает один и тот же ток, а напряжение на зажимах цепи, согласно второму закону Кирхгофа, равно сумме напряжений на сопротивлениях  $U = U_1 + U_2$ , то кривая  $I(U_1 + U_2)$  определится сложением абсцисс вольт-амперных характеристик этих сопротивлений при различных значениях тока.

По эквивалентной ВАХ  $I = f(U_1 + U_2)$  нелинейной цепи и заданному значению напряжения  $U$  без труда находим ток  $I$  в цепи. По найденному току  $I$  рассчитываем напряжение каждого из последовательно соединенных сопротивлений по их ВАХ.

При построении результирующей ВАХ параллельно соединенных нелинейных элементов (рис. 1.4) исходят из того, что напряжения на  $R_1$  и  $R_2$  равны, а ток в неразветвленной части схемы  $I = I_1 + I_2$ . В этом случае выполняют сложение ординат (токов) вольт-амперных характеристик при различных значениях напряжения.

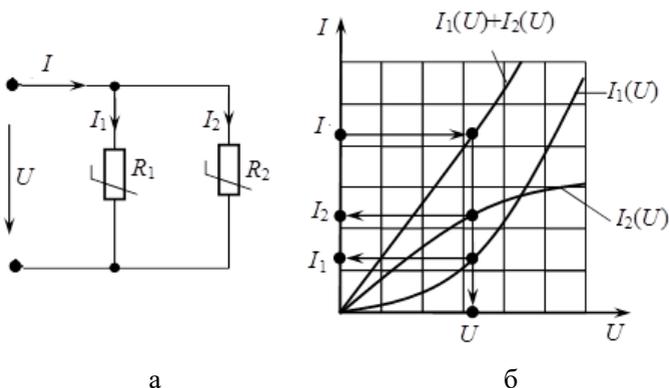


Рис. 1.4. Электрическая цепь с параллельным соединением нелинейных резистивных элементов (а) и ее ВАХ (б)

Тогда для параллельно включённых сопротивлений при известной эквивалентной ВАХ и известном значении источника тока можно рассчитать падение напряжения на параллельном участке цепи. А уже по известному падению напряжения и ВАХ конкретного нелинейного элемента легко рассчитывается ток через нелинейный элемент.

## Порядок выполнения индивидуальной расчетной части

Входное напряжение задано в табл. 1.3 согласно варианту.

Таблица 1.3

### Исходные данные индивидуальной расчетной части

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U, \text{В}$	25	30	35	40	45	50	55	60

1. Данный пункт выполняется *первым студентом* бригады.

В электрической цепи присутствуют нелинейные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Они включены последовательно в цепь постоянного тока (рис. 1.3, а). Их ВАХ соответственно  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$ , приведенные в табл. 1.4. Найти неизвестный ток  $I$  и напряжение на каждом нелинейном сопротивлении  $U_1$  и  $U_2$ , если известно входное напряжение цепи  $U$ .

Таблица 1.4

### Исходные данные индивидуальной расчетной части

$I_1(U_1)$	$I_1, \text{А}$	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
	$U_1, \text{В}$	0	25	40	60	73	80	85
$I_2(U_2)$	$I_2, \text{А}$	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	1,8
	$U_2, \text{В}$	0	4	8	20	40	80	115

2. Данный пункт выполняется *вторым студентом* бригады.

В электрической цепи постоянного тока (рис. 1.4) подано входное напряжение  $U$ . Также в цепь подключены параллельно нелинейные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Их ВАХ – соответственно  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$  – заданы в табл. 1.4. Рассчитать токи  $I_1$  и  $I_2$  ветвей и общий ток  $I$ .

3. Данный пункт выполняется *третьим студентом* бригады.

По ВАХ нелинейных элементов  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$  рассчитать дифференциальное  $R_{\text{диф}}$  и статическое  $R_{\text{ст}}$  сопротивления в точках, определяемых напряжениями  $U$  (табл. 1.3).

## Порядок выполнения экспериментальной части

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.

2. Соберите электрическую цепь (рис. 1.1, а) для снятия вольт-амперной характеристики резистора. **Обратите внимание, что применяется схема измерения с погрешностью по напряжению.** Изменяя ток в цепи, как задано в табл. 1.5, запишите в таблицу соответствующие значения напряжения на резисторе.

Таблица 1.5

Экспериментальная ВАХ резистора

$I, \text{мА}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$U, \text{В}$									

3. Замените резистор лампой накаливания. Снимите ВАХ лампы накаливания. Изменяя ток в цепи, как задано в табл. 1.6, запишите в таблицу соответствующие значения напряжения на лампе.

Таблица 1.6

Экспериментальная ВАХ лампы накаливания

$I, \text{мА}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$U, \text{В}$									

4. Замените лампу накаливания стабилитроном, соблюдая полярность, показанную в табл. 1.1, и снимите его вольт-амперную характеристику, устанавливая либо напряжения, либо токи, указанные в табл. 1.7. **Для увеличения точности при отрицательных напряжениях и токах применяется схема измерения с погрешностью по току (рис. 1.1, б), а при положительных – с погрешностью по напряжению (рис. 1.1, а).**

Таблица 1.7

Экспериментальная ВАХ стабилитрона

$I, \text{мА}$	-40	-20	0					4	10	20	40
$U, \text{В}$				1	2	3	4				

5. Замените стабилитрон полупроводниковым диодом, соблюдая полярность, показанную в табл. 1.1, и снимите его вольт-амперную характеристику, устанавливая либо напряжения, либо токи, указанные в табл. 1.6. **Для увеличения точности при отрицательных напряжениях и токах применяется схема измерения с погрешностью по напряжению (рис. 1.1, а), а при положительных – с погрешностью по току (рис. 1.1, б).**

Таблица 1.8

Экспериментальная ВАХ полупроводникового диода

$I, \text{ mA}$						2	5	10	20	30	40
$U, \text{ V}$	-8	-6	-4	-2	0						

6. Постройте на одной плоскости четыре вольт-амперные характеристики исследуемых элементов, используя данные табл. 1.5–1.8.

7. Соберите нелинейную электрическую цепь согласно варианту (табл. 1.2) и снимите экспериментальную эквивалентную ВАХ цепи. Показания приборов занесите в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Экспериментальная эквивалентная ВАХ электрической цепи

$I, \text{ mA}$	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
$U, \text{ V}$											

8. Используя экспериментальные ВАХ исследуемых элементов, графически найдите эквивалентную ВАХ всей цепи. На этом же графике построьте экспериментальную эквивалентную ВАХ (табл. 1.9) цепи и оцените точность эксперимента.

9. Выберите точку примерно в середине участка стабилизации ВАХ стабилитрона VD и рассчитайте соответствующие статическое и динамическое сопротивления.

10. По результатам физического эксперимента сделайте выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие элементы электрической цепи относятся к нелинейным?
2. Чем отличаются ВАХ линейных и нелинейных электрических цепей?
3. Дайте определение статического и дифференциального сопротивлений.
4. Дайте классификацию нелинейных элементов по виду ВАХ.
5. Какие методы применяются для расчета нелинейных электрических цепей?
6. Покажите порядок графического расчета неразветвленной и разветвленной нелинейной цепи постоянного тока.

## Лабораторная работа 2

### Исследование нелинейной индуктивности и явления феррорезонанса

**Цель работы** — изучение экспериментальных и расчетных методов определения параметров схемы замещения нелинейной индуктивности и исследование резонансных режимов в нелинейных цепях.

#### Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Снять вольт-амперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником, а также последовательной и параллельной феррорезонансных цепей.
3. Рассчитать вольт-амперную характеристику для последовательной цепи (рис. 2.1) и сравнить ее с экспериментальной.
4. Построить по результатам измерений вольт-амперную характеристику для цепи с параллельным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и линейной емкости (рис. 2.2).

#### Описание лабораторной установки

В работе исследуется катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока. В качестве нелинейной катушки используется одна катушка на 200 витков мини-блока «Магнитная цепь».

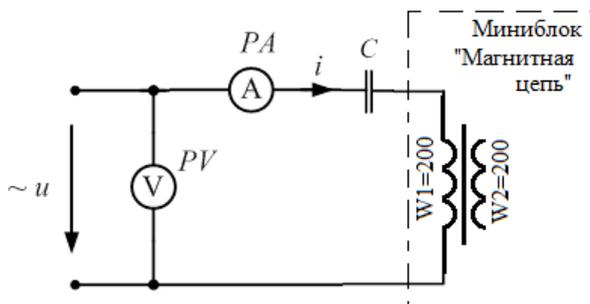


Рис. 2.1. Электрическая схема последовательного соединения катушки с ферромагнитным сердечником и линейной емкости

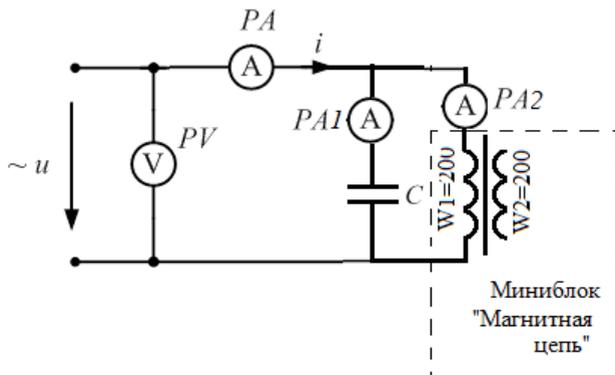


Рис. 2.2. Электрическая схема параллельного соединения катушки с ферромагнитным сердечником и линейной емкости

Источником синусоидальной ЭДС служит блок генераторов напряжений. Синусоидальное напряжение на выходе генератора задается переключателем «Форма». Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «Амплитуда» в диапазоне 0...12 В, а частота — ручкой энкодера-потенциометра.

Для измерения величин  $I$  и  $U$  в исследуемых цепях используют блоки мультиметров.

### Пояснения к выполнению индивидуальной расчетной части

При подключении катушки с магнитопроводом к источнику синусоидального напряжения  $u = U_m \sin(\omega t)$  по обмотке катушки протекает переменный ток  $i$ , магнитодвижущая сила  $F = iw$  создает магнитное поле, индуктивность которого характеризуется магнитной индукцией  $B$  и магнитным потоком  $\Phi$ .

В реальном дросселе большая часть магнитных линий замыкается по сердечнику (основной магнитный поток). Другая часть магнитных линий охватывает отдельные витки и группы витков обмотки, замыкается по воздуху и частично по магнитопроводу (поток рассеяния  $\Phi_\sigma$  на рис. 2.3).

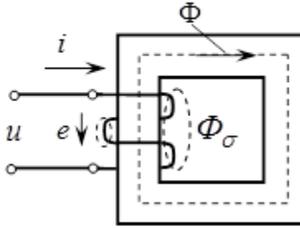


Рис. 2.3. Катушка индуктивности с магнитопроводом

Переменный магнитный поток индуцирует в обмотке ЭДС самоиндукции

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Если пренебречь сопротивлением обмотки  $R$ , потоком рассеяния  $\Phi_\sigma$  и потерями в магнитопроводе, то по второму закону Кирхгофа ЭДС самоиндукции уравновешивается величиной входного напряжения:

$$u = -e_L, \text{ или } U_m \sin(\omega t) = w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Из этого уравнения получаем закон изменения во времени магнитного потока:

$$\Phi = \frac{U_m}{w} \int \sin(\omega t) dt = \frac{-U_m}{w\omega} \cos(\omega t), \text{ или } \Phi = \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ),$$

т. е. при синусоидальном напряжении на входе катушки магнитный поток в магнитопроводе также синусоидален.

Если величину амплитудного значения магнитного потока выразить через действующее значение напряжения и линейную частоту  $f$ , то

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f w}.$$

Поскольку действующие значения напряжения  $U$  и ЭДС самоиндукции  $e_L$  одинаковы, то

$$e_L = 4,44 f w \Phi_m.$$

Данное соотношение применяют для расчетов ЭДС, индуцируемых в обмотках трансформаторов, и называют уравнением трансформаторной ЭДС.

При синусоидальном потоке из-за нелинейности характеристики  $B(H)$  ток катушки несинусоидален. Для упрощения расчетов несинусоидальный ток заменяют эквивалентным синусоидальным, имеющим одинаковое с несинусоидальным током действующее значение и развивающим одинаковую с ним активную мощность.

Обмотка реальной катушки с сердечником обладает активным сопротивлением  $R$ . Полный магнитный поток катушки является суммой основного потока в магнитопроводе и потока рассеяния:  $\Phi_{\Sigma} = \Phi + \Phi_{\sigma}$ . Величина основного потока  $\Phi$  определяется свойствами материала магнитопровода. Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma}$  зависит от конструкции обмотки, взаимного расположения витков, их сечения и составляет 3...5 % от основного потока. Потокосцепление рассеяния пропорционально току:

$$\Psi_{\sigma} = L_{\sigma} i,$$

где  $L_{\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки.

С учетом активного сопротивления обмотки  $R$  и потокосцепления рассеяния  $\Psi_{\sigma}$  напряжение на входе катушки

$$u = Ri + \frac{d\Psi_{\sigma}}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt} = Ri + L_{\sigma} \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt} = u_R + u_{L_{\sigma}} + u_0.$$

Таким образом, реальную катушку с магнитопроводом можно представить схемой замещения в виде последовательного соединения  $R$ ,  $L_{\sigma}$  и идеализированной катушки (рис. 2.4). У идеализированной катушки обмотка не имеет сопротивления и рассеяния. Свойства идеализированной катушки зависят только от параметров магнитопровода и режима его намагничивания.

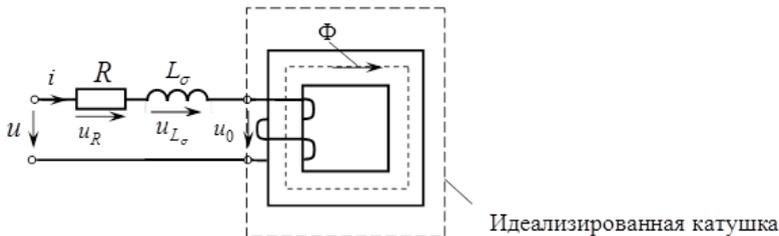


Рис. 2.4. Схема замещения катушки индуктивности с сердечником

Напряжение  $u_0$  уравновешивает ЭДС индукции идеализированной катушки  $e_L$  и опережает магнитный поток на  $90^\circ$ .

Переход к эквивалентным синусоидам тока дает возможность записывать все соотношения в комплексной форме и пользоваться векторными диаграммами.

Комплексное действующее значение входного напряжения запишется в виде

$$\underline{U} = R\underline{I} + j\omega L_{\sigma}\underline{I} + \underline{U}_0.$$

Схема замещения идеализированной катушки зависит от параметров магнитопровода и режима его намагничивания. Если предположить, что магнитопровод изготовлен из ферромагнетика с линейной зависимостью  $B = \mu\mu_0 H$  и в нем отсутствуют потери на вихревые токи и перемагничивание, то

$$\Phi = BS = \mu\mu_0 HS = \frac{\mu\mu_0 S w}{l_{\text{cp}}} i,$$

и напряжение на входе катушки

$$u = Ri + L_{\sigma} \frac{di}{dt} + L \frac{di}{dt},$$

где  $L$  — индуктивность идеализированной катушки,  $L = \frac{\mu\mu_0 S w^2}{l_{\text{cp}}}$ .

При учете потерь, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами в сердечнике (зависимость  $B(H)$  петлевая), ток в обмотке катушки опережает магнитный поток на угол потерь  $\alpha$  и может быть разложен на две составляющие. Активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением  $\underline{U}_0$  и называется током потерь  $I_a = I_n$ , она определяется через мощность потерь в стали. Реактивная составляющая тока отстает от напряжения  $\underline{U}_0$  на  $90^\circ$ , называется током намагничивания  $I_p = I_{\mu}$  и определяется из закона полного тока.

В комплексной форме ток  $\underline{I} = I_n + jI_{\mu} = Ie^{j\alpha}$ . Комплексная полная проводимость идеализированной катушки

$$\underline{Y}_k = \frac{Ie^{j\alpha}}{U_0 e^{j90^\circ}} = \frac{I}{U_0} e^{j(\alpha-90^\circ)} = \frac{I}{U_0} \cos(\alpha-90^\circ) + j \frac{I}{U_0} \sin(\alpha-90^\circ) = g + jb.$$

Заменив идеализированную катушку параллельным соединением  $g$  и  $b$ , получаем схему замещения реальной катушки для рассматриваемого случая (рис. 2.5).

Векторная диаграмма реальной катушки индуктивности с магнитопроводом, имеющим петлевое намагничивание, представлена на рис. 2.6.

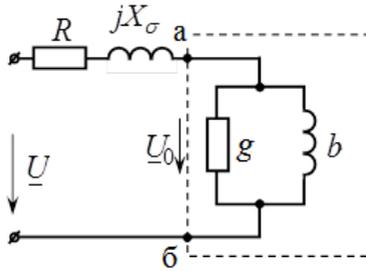


Рис. 2.5. Схема замещения нелинейной катушки индуктивности

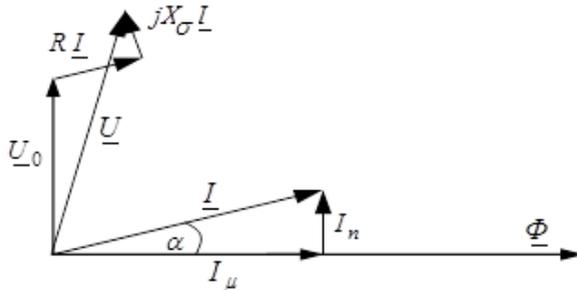


Рис. 2.6. Векторная диаграмма реальной нелинейной катушки индуктивности

Для приближенного определения параметров схемы замещения проводят два опыта: по постоянному току и переменному току. В результате эксперимента получают  $U_-, I_-$  по постоянному току и  $U_~, I_~, P$  по переменному току. Индуктивное сопротивление рассеяния обычно принимают в 3–5 % от реактивного сопротивления эквивалентного двухполюсника, определенное по формуле

$$X = \sqrt{Z^2 - R_{\text{эКВ}}^2},$$

где  $z = \frac{U_~}{I_~}$ ,  $R_{\text{эКВ}} = \frac{P}{I_~^2}$ .

Активное сопротивление обмотки находят по измерению на постоянном токе:  $R = \frac{U_-}{I_-}$ .

Тогда комплексную проводимость участка **аб** схемы замещения (рис. 2.5) можно найти по следующим формулам:

$$\underline{Y}_{a6} = \frac{1}{\underline{Z}_{a6}}; \underline{Z}_{a6} = R_{a6} + jX_{a6}; R_{a6} = R_{\text{экв}} - R; X_{a6} = X - X_{\sigma};$$

$$g = \frac{R_{a6}}{R_{a6}^2 + X_{a6}^2}; b = \frac{X_{a6}}{R_{a6}^2 + X_{a6}^2}.$$

В цепях с нелинейной индуктивностью, содержащих емкость, плавное изменение напряжения источника питания может вызывать скачки фазы и амплитуды основной гармоники тока, и наоборот, плавное изменение тока источника питания (источник тока) может сопровождаться скачкообразным изменением фазы и амплитуды основной гармоники напряжения на некоторых участках цепи. Эти явления носят названия феррорезонанса.

Феррорезонанс напряжений можно наблюдать в цепи с последовательным соединением нелинейной индуктивности и линейной емкости (рис. 2.7, а), векторная диаграмма которой представлена на рис. 2.7, б. Вольт-амперная характеристика нелинейной катушки с ферромагнитным сердечником имеет вид  $U_L(I)$ , изображенный на рис. 2.7, в, здесь же изображена прямолинейная вольт-амперная характеристика  $U_C(I)$  конденсатора. В точке пересечения  $U_L = U_C$ , и всё напряжение питания оказывается приложенным к активному сопротивлению катушки — в цепи возникает резонанс напряжений.

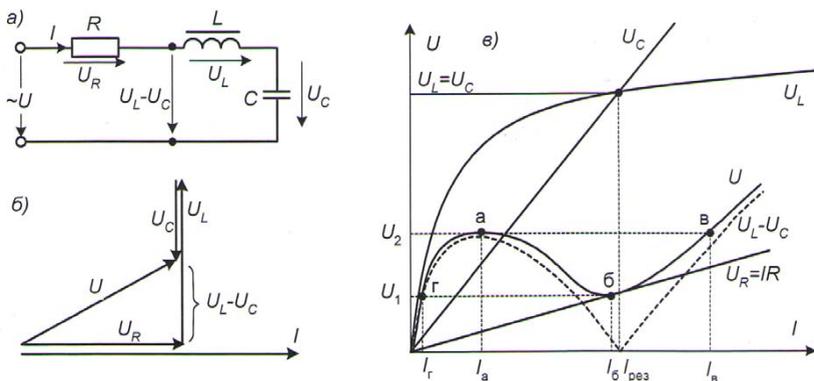


Рис. 2.7. Последовательная резонансная цепь: а — электрическая схема; б — векторная диаграмма; в — ВАХ

Вольт-амперную характеристику всей цепи  $U(I)$  можно построить, используя векторную диаграмму (рис. 2.7, б). Сначала при различных значениях тока находим разность напряжений  $U_L - U_C$ , затем определяем приложенное к цепи напряжение по формуле, вытекающей из векторной диаграммы:

$$U = \sqrt{(U_L - U_C)^2 + U_R^2}, \text{ и } U_R = RI.$$

Эта характеристика изображена на рис. 2.7, в. Реальная вольт-амперная характеристика лежит несколько выше расчетной, так как при  $I = I_{\text{рез}}$  компенсируются только первые гармоники напряжений  $U_L$  и  $U_C$ , поэтому разность действующих значений этих напряжений при резонансе равна  $U_R$ .

Вольт-амперная характеристика имеет падающий участок **аб**. При увеличении приложенного к цепи напряжения от 0 до  $U_2$  ток в цепи возрастает в соответствии с вольт-амперной характеристикой, но при дальнейшем увеличении напряжения ток возрастает скачком от значения  $I_a$  до значения  $I_b$ . Далее он продолжает плавно увеличиваться в соответствии с вольт-амперной характеристикой. При уменьшении напряжения до значения  $U_1$  ток уменьшается плавно, но в точке **б** он скачком уменьшается от значения  $I_6$  до значения  $I_r$ . Таким образом, при питании от источника напряжения ток никогда не принимает устойчивых значений, соответствующих участку **аб** вольт-амперной характеристики. Этот участок характеристики может быть экспериментально снят только при питании от источника тока.

Феррорезонанс токов можно наблюдать в питающейся от источника тока цепи с параллельным соединением нелинейной индуктивности и линейной ёмкости (рис. 2.8, а). Если не учитывать активное сопротивление и потери в стали, то  $I = I_L + I_C$  и в соответствии с векторной диаграммой (рис. 2.8, б) величина общего тока  $I = |I_L - I_C|$ .

Выбирая величину емкости  $C$  так, чтобы ее вольт-амперная характеристика  $U_C(I)$  пересекала вольт-амперную характеристику катушки  $U_L(I)$  (рис. 2.8, в), находим вольт-амперную характеристику параллельного соединения катушки и емкости. Разность абсцисс кривых  $U_L(I)$  и  $U_C(I)$  дает кривую  $U(I)$ .

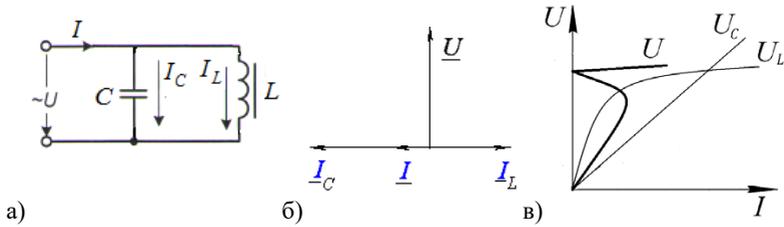


Рис. 2.8. Параллельная резонансная цепь:  
*a* – электрическая схема; *б* – векторная диаграмма; *в* – ВАХ

### Определение величины емкости конденсатора, при которой ток в цепи после скачка будет равен заданной величине

Для приближенного вычисления величины емкости конденсатора, при которой ток в цепи после скачка будет равен заданной величине, можно воспользоваться графическим расчетом (рис. 2.9). Сначала построим вольт-амперную характеристику катушки со стальным сердечником  $U_L(I)$ . Затем по оси абсцисс откладываем отрезок  $OM$ , равный заданной величине тока после скачка (рис. 2.9). Через точку  $M$  проводим вертикальную линию. Далее подбираем вольт-амперную характеристику конденсатора  $U_C(I)$  так, чтобы отрезки  $AB$  и  $CD$  были равны (отрезок  $AB$  – наибольшее расстояние между характеристиками  $U_L(I)$  и  $U_C(I)$ ). Величина  $X_C$  определяется из соотношения  $MC$  и  $OM$ :

$$X_C = \frac{MC}{OM}.$$

Искомая емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega X_C}.$$

Вольт-амперную характеристику последовательного соединения катушки и емкости  $U(I)$  можно получить вычитанием ординат вольт-амперных характеристик катушки  $U_L(I)$  и ёмкости  $U_C(I)$ .

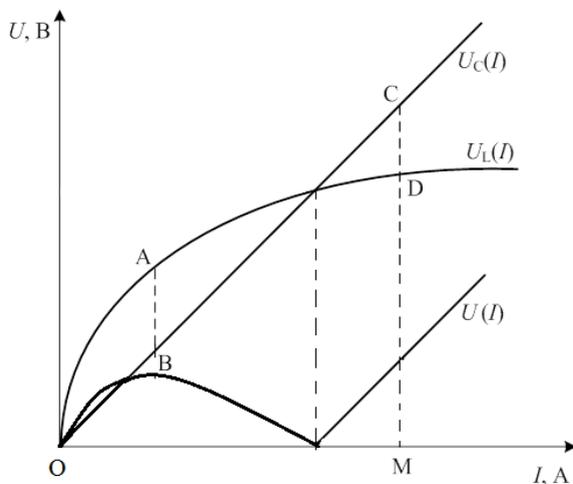


Рис. 2.9. Методика нахождения величины емкости конденсатора при последовательном соединении нелинейной катушки индуктивности и конденсатора

### Порядок выполнения индивидуальной расчетной части

1. Данный пункт выполняется *первым студентом* бригады.

Рассчитайте параметры схемы замещения и постройте соответствующую векторную диаграмму катушки с ферромагнитным сердечником по результатам экспериментов на постоянном и переменном токе.

На постоянном токе  $U = 1$  В;  $I = 100$  мА.

На переменном токе  $U = U$  (табл. 2.1);  $I = I$  (табл. 2.1);  $P = 50$  мВт.

Известно, что индуктивность рассеяния приблизительно составляет 10 % от индуктивности катушки.

2. Данный пункт выполняется *вторым студентом* бригады.

Пользуясь вольт-амперной характеристикой нелинейной катушки индуктивности (рис. 2.10) и пренебрегая влиянием активного сопротивления и высших гармоник, рассчитайте, конденсатор какой емкости  $C$  необходимо включить последовательно с катушкой, чтобы после характерного для феррорезонанса напряжений скачка тока величина его в цепи была равна заданному значению тока  $I$  (табл. 2.1). Определив требуемую величину емкости, на том же графике постройте вольт-амперную характеристику цепи.

Исходные данные индивидуальной расчетной части

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$C$ , мкФ	4,4	4,87	5,4	5,87	4,4	4,87	5,4	5,87
$I$ , мА	50	50	70	70	60	60	80	80
$U$ , В	6,5	6,5	7	7	7,5	7,5	8	8

3. Данный пункт выполняется *третьим студентом* бригады.

Пользуясь вольт-амперной характеристикой нелинейной катушки индуктивности (рис. 2.10) и пренебрегая влиянием активного сопротивления и высших гармоник, рассчитайте емкость конденсатора  $C$ , который необходимо включить параллельно с катушкой, чтобы в момент характерного для феррорезонанса токов скачка напряжений величина тока в цепи была равна половине от значения тока  $I$  по табл. 2.1. Определив требуемую величину емкости, на том же графике постройте вольт-амперную характеристику цепи.

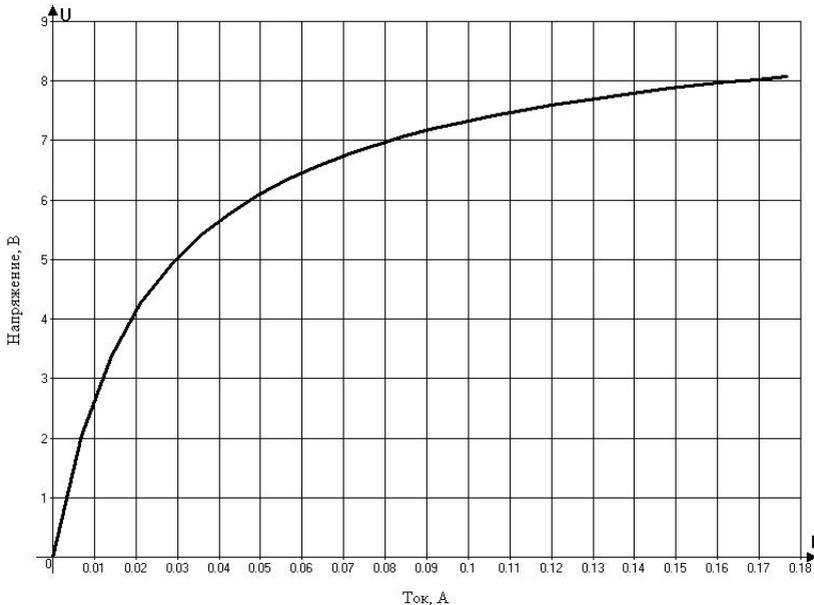


Рис. 2.10. ВАХ нелинейной катушки индуктивности

### Порядок выполнения экспериментальной части

1. Соберите электрическую цепь, соответствующую схеме на рис. 2.1. Исключите немагнитный зазор в катушке, если он имеется.

2. К катушке и конденсатору подключите мультиметры в режиме измерения переменного тока и напряжения. Следует помнить, что напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности может превышать входное напряжение. Величину емкости конденсатора  $C$  возьмите согласно своему варианту (табл. 2.1). Собранную схему покажите преподавателю или лаборанту.

3. Включите генератор, установите частоту  $f_1 = 400$  Гц.

4. Плавно уменьшая и увеличивая напряжение генератора, убедитесь, что в цепи происходят скачки тока. При необходимости подрегулируйте частоту генератора так, чтобы ток после скачка составлял  $I$ . Полученное значение частоты занесите в табл. 2.2.

5. Плавно увеличивая напряжение от 0, снимите показания на участке  $0a$  вольт-амперной характеристики (см. рис. 2.7,  $\vartheta$ ). Увеличьте напряжение несколько выше точки  $\vartheta$  и, уменьшая его, снимите показания на участке характеристики  $\vartheta b$ . Результаты измерений занесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Исследование последовательного соединения нелинейной катушки и конденсатора

	Участок $0a$						$U > U_2$	Участок $\vartheta b$			
$U, \text{В}$											
$I, \text{мА}$											
$f, \text{Гц}$											

6. Постройте графики изменения показаний, снятых на участках характеристики, и соедините их между собой пунктирной линией.

7. Для снятия вольт-амперной характеристики катушки индуктивности удалите из схемы конденсатор. Собранную схему покажи-

те преподавателю или лаборанту. Исключите немагнитный зазор, если он имеется.

8. Включите мультиметры. Включите генератор, установите частоту  $f_1 = f$ , полученную в процессе эксперимента. Увеличивая напряжение на катушке и контролируя ток от нуля до 150 мА с шагом 10 мА, внесите в табл. 2.3 значения напряжения на катушке и тока.

Таблица 2.3

Экспериментальная ВАХ нелинейной катушки

Экспериментальные данные		Расчетные данные				
$I$ , мА	$U_{RL}$ , В	$U_R$ , В	$U_L$ , В	$U_C$ , В	$U_L - U_C$ , В	$U$ , В

9. Измерьте омметром величину активного сопротивления катушки и вычислите емкостное сопротивление конденсатора:

$$R_k = \dots \text{ Ом}, X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \dots \text{ Ф.}$$

10. Рассчитайте и запишите в табл. 2.3 значения

$$U_R = R_k I, U_L = \sqrt{U_{RL}^2 - U_R^2}, U_C = X_C I, U_L - U_C, U = \sqrt{(U_L - U_C)^2 + U_R^2}.$$

11. Постройте график  $U(I)$  и сравните его с экспериментальным графиком.

12. По результатам экспериментов рассчитайте параметры схемы замещения катушки для линейного участка ВАХ. Индуктивность рассеяния, как и прежде, принимается равной 10 % от индуктивности катушки.

13. Постройте методом засечек две векторные диаграммы для режимов до и после резонанса, считая конденсатор чисто реактивным элементом, а ток и напряжение — эквивалентными синусоидами.

14. Соберите схему (рис. 2.2), установите ту же величину емкости. Плавно изменяя напряжение в пределах от 0 до 12 В, определите напряжение, при котором ток в цепи будет минимальным. Увеличивая напряжение и контролируя ток в цепи, снимите несколько значений с шагом по току 20...30 мА до достижения 100 мА. Для участка ВАХ ниже точки минимума тока снимите показания приборов, уменьшая напряжение с шагом 1 В. Результаты измерений запишите в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Исследование параллельного соединения  
нелинейной катушки и конденсатора

Экспериментальные данные			
$U$ , В	$I$ , мА	$I_L$ , мА	$I_C$ , мА

15. Постройте по результатам измерений зависимости общего тока, тока в катушке и тока емкости от приложенного напряжения. Полученные кривые сравните с расчетными. Объясните,

почему при проведении опыта не было ни скачков тока, ни скачков напряжения.

16. Сделайте выводы по результатам экспериментов.

### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите о назначении ферромагнитных материалов в электротехнических устройствах. Назовите их основные магнитные характеристики.
2. Объясните нелинейный характер вольт-амперной характеристики катушки с магнитопроводом.
3. Какие схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником существуют? Объясните различие между идеализированной и реальной индуктивными катушками.
4. Поясните, за счет чего ток в обмотке катушки опережает магнитный поток  $\Phi_m$  по фазе.
5. Напишите формулу зависимости амплитуды магнитного потока от действующего значения напряжения питания.

### Лабораторная работа 3

#### Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с одним реактивным элементом

**Цель работы** — изучение расчетных и экспериментальных методов анализа переходных процессов в линейных электрических цепях с одним реактивным элементом.

#### Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Исследовать характер процессов включения под напряжение и короткого замыкания катушки индуктивности.
3. Исследовать характер процессов зарядки и разрядки конденсатора.

#### Описание лабораторной установки

В работе исследуются переходные процессы в электрических цепях с индуктивным элементом  $L$  и конденсатором  $C$  (рис. 3.1).

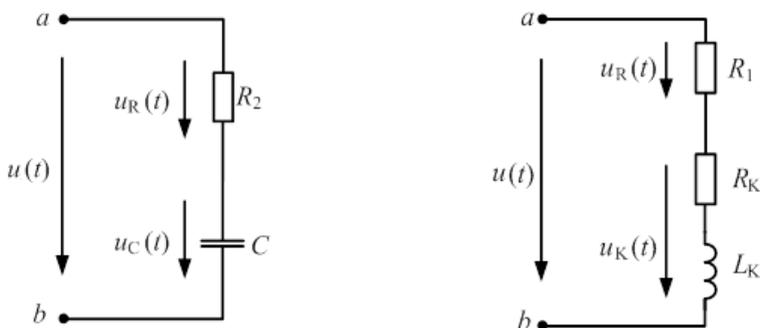


Рис. 3.1. Исследуемая электрическая цепь с одним реактивным элементом

В данной работе вместо переключателя используется источник периодического прямоугольного напряжения, который подключается к зажимам  $a$  и  $b$  исследуемой цепи. Однополярные прямоугольные импульсы напряжения на выходе генератора задаются

переключателем «Форма», амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «Амплитуда».

Для наблюдения за переходными процессами в исследуемых цепях при проведении эксперимента используется двухканальный осциллограф.

### Краткие теоретические сведения

Переход от одного установившегося режима к другому называется переходным процессом, длительность которого обычно измеряется долями секунды, однако токи и напряжения в это время в цепи могут принимать значения во много раз большие, чем в установившемся.

*Первый закон (правило) коммутации.* Ток, протекающий через индуктивный элемент непосредственно до коммутации  $i_L(0_-)$ , равен току через тот же индуктивный элемент непосредственно после коммутации  $i_L(0_+)$ :  $i_L(0_-) = i_L(0_+)$ .

*Второй закон (правило) коммутации.* Напряжение на емкостном элементе непосредственно до коммутации  $u_C(0_-)$  равно напряжению на нём непосредственно после коммутации  $u_C(0_+)$  в связи с невозможностью скачка напряжения на емкости:  $u_C(0_-) = u_C(0_+)$ .

Коммутация происходит в момент времени, равный нулю.

Токи и напряжения в переходном процессе называются переходными токами и напряжениями и обозначаются  $i(t)$  и  $u(t)$ . Те же величины установившегося режима называются принужденными и обозначаются  $i_{\text{пр}}(t)$  и  $u_{\text{пр}}(t)$ . Токи и напряжения свободного режима обозначаются  $i_{\text{св}}(t)$  и  $u_{\text{св}}(t)$ . Введя эти обозначения, получим

$$i(t) = i_{\text{пр}}(t) + i_{\text{св}}(t), \quad u(t) = u_{\text{пр}}(t) + u_{\text{св}}(t).$$

Постоянные интегрирования общих интегралов дифференциальных уравнений, описывающих рассчитываемую схему, определяются по начальным условиям, под которыми понимают переходные токи и напряжения в момент коммутации (при  $t = 0$ ), т. е.  $i(0)$  и  $u(0)$ . При этом

$$i(0) = i_{\text{пр}}(0) + i_{\text{св}}(0), \quad u(0) = u_{\text{пр}}(0) + u_{\text{св}}(0).$$

Начальные условия, которые определяются непосредственно по законам коммутации, называются независимыми начальными

условиями. Остальные начальные условия называются зависимыми и определяются из уравнений, составленных на основании законов Кирхгофа для момента времени  $t = 0$  с учетом независимых начальных условий.

Цепи, содержащие одну индуктивность или одну емкость, имеют одно независимое начальное условие —  $i_L(0)$  или  $u_C(0)$  — и описываются системами уравнений первого порядка.

При анализе переходных процессов с одним реактивным элементом вводят понятие постоянной времени  $\tau$ , под которой понимают величину, обратную коэффициенту затухания:

$$\tau = \frac{1}{|p|},$$

т. е. переходный ток в любой ветви и переходное напряжение на каждом элементе схемы могут быть представлены выражениями

$$i(t) = i_{\text{пр}}(t) + i_{\text{св}}(0)e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad u(t) = u_{\text{пр}}(t) + u_{\text{св}}(0)e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

В  $RC$ -цепи (рис. 3.2, *a*) переключатель переводится из нижнего положения в верхнее при  $t = 0$ , и конденсатор начинает заряжаться. В процессе заряда ток и напряжение на конденсаторе изменяются во времени (рис. 3.2, *б*) в соответствии с уравнениями

$$i_C = \frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad u_C = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

При опытным определении постоянной времени  $\tau$  достаточно рассмотреть только одну из кривых свободного тока или напряжения. Постоянная времени равна времени, в течение которого свободный ток или напряжение уменьшаются в  $e$  раз ( $e = 2,718$ ). По графику  $i_{\text{св}}(t)$  или  $u_{\text{св}}(t)$  можно найти постоянную времени (рис. 3.2, *б*). Для этого проведем касательную к кривой  $i_{\text{св}}(t)$  в любой ее точке. Постоянная времени численно равна длине проекции на ось абсцисс отрезка от точки касания до точки пересечения с осью абсцисс.

За время  $(3...5)\tau$  процесс почти полностью затухает. Постоянная  $\tau$  времени цепи, содержащей последовательно соединенные  $R$  и  $C$ , равна произведению  $RC$ :  $\tau = RC$ .

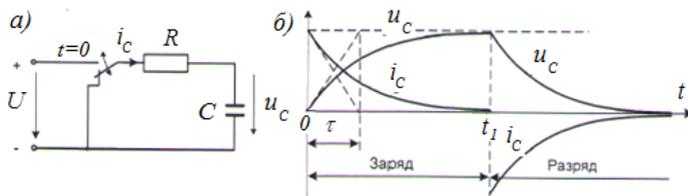


Рис. 3.2. Переходные процессы в  $RC$ -цепи:  
*a* – схема цепи; *б* – график изменения тока и напряжения

При  $t = t_1$  переключатель переводится в нижнее положение и конденсатор начинает разряжаться на сопротивление. Ток и напряжение на конденсаторе изменяются в соответствии с уравнениями

$$i_C = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad u_C = U e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где также  $\tau = RC$ .

В  $RL$ -цепи (рис. 3.3, *a*) переключатель переводится из нижнего положения в верхнее при  $t = 0$  и ток в катушке начинает увеличиваться по экспоненциальному закону:

$$i_L = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

где  $\tau = \frac{L}{R}$  – постоянная времени (рис. 3.3, *б*).

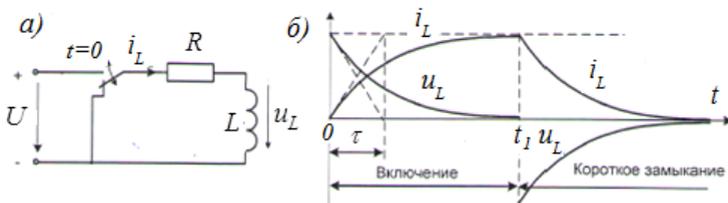


Рис. 3.3. Переходные процессы в  $RL$ -цепи: *a* – схема цепи;  
*б* – график изменения тока и напряжения

При этом ЭДС самоиндукции направлена навстречу току и препятствует его нарастанию. Постепенно напряжение самоиндукции уменьшается:

$$u_L = U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

При  $t = (3...5)\tau$  ток практически достигает установившегося значения, и процесс прекращается.

При  $t = t_1$  переключатель переводится в нижнее положение, и ток теперь идет через перемычку помимо источника. ЭДС самоиндукции меняет знак и препятствует его уменьшению. Ток и напряжение на катушке изменяются в соответствии с выражениями

$$i_L = -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}, u_L = Ue^{-\frac{t}{\tau}}.$$

### Задание на подготовку к выполнению экспериментальной части

Определите постоянную времени цепи с одним реактивным элементом (рис. 3.1) и частоту питающего напряжения в переходном процессе. Исходные данные определяются номером стенда и соответствуют строке в табл. 3.1. Величины с одной звездочкой даны для студентов первой группы потока, с двумя звездочками – второй.

Таблица 3.1

Исходные данные для расчетной части

Номер стенда	$R_k^*$ , Ом	$L_k^*$ , мГн	$C^*$ , мкФ	$R_k^{**}$ , Ом	$L_k^{**}$ , мГн	$C^{**}$ , мкФ	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом
1	128	66	0,22	188	100	0,47	43	2200
2	128	66	0,47	188	100	0,22	57	1000
3	128	66	0,69	188	100	1	80	470
4	128	66	1	188	100	0,69	100	330
5	188	100	1,22	128	66	1,47	122	267
6	188	100	1,47	128	66	1,22	147	220
7	188	100	1,69	128	66	4,4	180	147
8	188	100	4,4	128	66	1,69	220	100

## Порядок выполнения экспериментальной части

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.

2. Соберите электрическую цепь с ёмкостным элементом (рис. 3.1). Значения для  $C$  и  $R_2$  возьмите из табл. 3.1 в соответствии с заданным вариантом. Подсоедините к входным зажимам цепи регулируемый источник напряжения специальной формы, настроенный на прямоугольные импульсы положительной полярности с амплитудой  $U = 8$  В и частотой последовательности импульсов  $f$  при  $t_{\text{и}} = 5\tau$ .

3. Зарисуйте форму и параметры прямоугольного импульса.

4. Подключите осциллограф к двум участкам исследуемой электрической цепи и зарисуйте форму и параметры переходных напряжений. Напряжение с катушки или конденсатора подается на первый канал осциллографа. Сигналы, пропорциональные току, снимаются с резисторов  $R_1$  или  $R_2$  и подаются на второй канал осциллографа. Схемы подключения осциллографа приведены на рис. 3.4 и 3.5. Значение напряжения на резисторе  $R_2$  в момент времени  $t = 0,3$  мс запишите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Экспериментальные и расчётные данные для  $RC$ -цепи

	$R$ , Ом	$\tau$ , мс	$C$ , мкФ	$U$ , В
Эксперимент				
Расчет				

5. Прделайте аналогичные эксперименты для электрической цепи с катушкой индуктивности (рис. 3.1). Напряжение на резисторе  $R_1$  при  $t = 0,3$  мс запишите в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Экспериментальные и расчётные данные для  $RL$ -цепи

	$R$ , Ом	$\tau$ , мс	$L$ , мГн	$U$ , В
Эксперимент				
Расчет				

6. Полученные в каждом опыте кривые напряжения перенесите в отчет. Убедитесь, что выполняются законы Кирхгофа и законы коммутации.

7. Используя графические результаты экспериментов, запишите аналитические выражения переходных напряжений на элементах цепи. Рассчитайте по результатам эксперимента постоянные времени и параметры исследуемых цепей. Полученные данные занесите в табл. 3.2 и 3.3 и сравните с расчетными.

8. По результатам физического эксперимента сделайте выводы.

### **Подключение двухканального осциллографа к двум участкам цепи**

При одновременном наблюдении напряжений на двух различных участках цепи с помощью двухканального осциллографа следует помнить о том, что общие провода каждого канала, как правило, гальванически связаны. Поэтому они должны быть подсоединены к одной точке цепи, либо к этой точке подключается лишь один общий провод, а второй провод при этом должен быть изолирован от возможных контактов с цепью. В противном случае по цепи общего провода возникает короткое замыкание, что может привести к выходу из строя осциллографа или исследуемой цепи. Таким образом, с помощью двухканального осциллографа можно наблюдать напряжения на двух участках цепи, имеющих общую точку соединения, к которой подключается общий провод. При исследовании напряжений на двух смежных участках один из сигналов, очевидно, будет иметь полярность, противоположную реальному значению. Для устранения этого эффекта служит переключатель полярности сигнала (инвертирование), обычно связанный со вторым каналом осциллографа. В этом случае подключение первого канала определяет желаемую полярность наблюдаемых напряжений, а сигнал второго канала инвертируется. Примеры подключения осциллографа для наблюдения напряжений в цепях  $RL$  и  $RC$  приведены на рис. 3.4 и 3.5 соответственно.

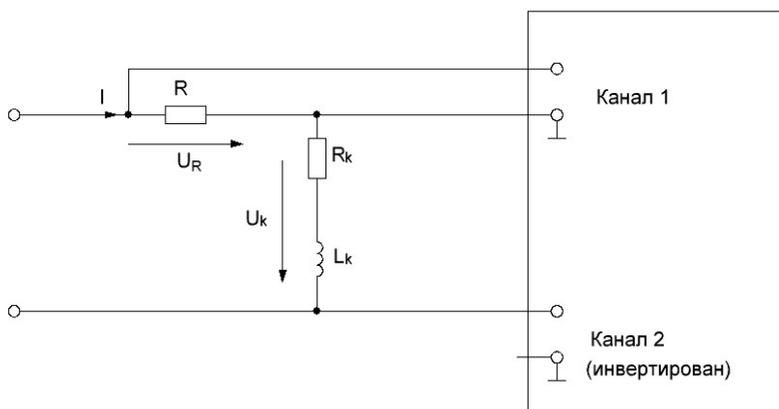


Рис. 3.4. Подключение двухканального осциллографа к  $RL$ -цепи

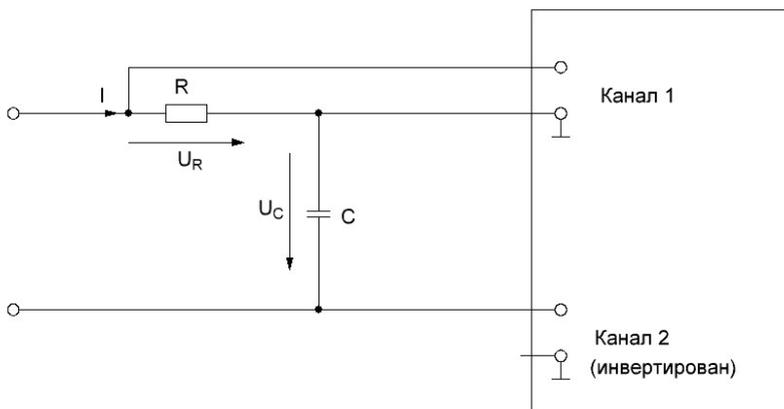


Рис. 3.5. Подключение двухканального осциллографа к  $RC$ -цепи

### Контрольные вопросы

1. В чём различие принужденного и свободного режимов переходного процесса?
2. Сформулируйте законы коммутации.
3. Какие начальные условия существуют? Дайте понятия независимых и зависимых начальных условий.
4. Чем определяется длительность переходного процесса?
5. Что называется постоянной времени переходного процесса?

## Лабораторная работа 4

### Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с двумя реактивными элементами

**Цель работы** — изучение расчетных и экспериментальных методов анализа переходных процессов в линейных электрических цепях с двумя реактивными элементами.

#### Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Исследовать экспериментально переходные процессы в электрических цепях с последовательным соединением  $RLC$ .
3. Используя графические результаты экспериментов, записать аналитическое выражение переходного напряжения на конденсаторе при колебательном переходном процессе.

#### Описание лабораторной установки

В работе исследуются переходные процессы в электрических цепях с последовательным соединением резистора  $R_D$ , индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$  (рис. 4.1).

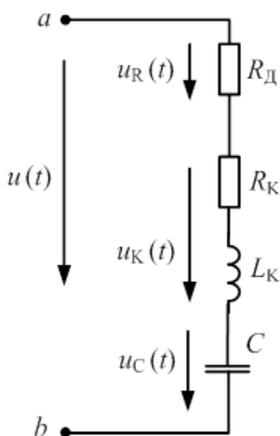


Рис. 4.1. Исследуемая электрическая цепь с двумя реактивными элементами

К зажимам *a* и *b* исследуемой цепи подключается регулируемый источник напряжений специальной формы. В данной работе заряд конденсатора до напряжения  $U$  осуществляется однополярными прямоугольными импульсами напряжения. Исследуется процесс его разряда на сопротивление и индуктивность во время пауз между импульсами. Прямоугольное напряжение на выходе генератора задается переключателем «Форма», амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «Амплитуда».

Для наблюдения за переходными процессами в исследуемых цепях при проведении эксперимента используется двухканальный осциллограф.

### Краткие теоретические сведения

В замкнутом контуре (рис. 4.2) после отключения его от источника постоянного или переменного напряжения возникает переходный процесс, обусловленный начальным запасом энергии в электрическом поле конденсатора и в магнитном поле катушки индуктивности. Этот процесс может носить как апериодический, так и колебательный характер.

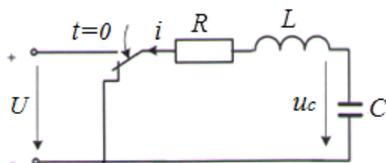


Рис. 4.2. Последовательная  $RLC$ -цепь

В общем случае состояние цепи определяется из дифференциального уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_C = 0.$$

Поскольку  $i = C \frac{du_C}{dt}$ , то

$$RC \frac{du_C}{dt} + LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = 0,$$

или

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0.$$

Вид решения этого дифференциального уравнения зависит от характера корней характеристического уравнения

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Корни этого уравнения

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

Когда  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} > 0$ , т. е.  $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} = R_{\text{кр}}$ , корни вещественные отрицательные и процесс изменения тока и напряжения имеет аperiodический затухающий характер (рис. 4.3, а). Общим решением дифференциального уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа, является выражение  $u_C = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$ , где  $A_1$  и  $A_2$  — вещественные постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий  $u_C(0)$ ,  $i_L(0)$ . В данном случае имеем  $u_C(0) = U$  и  $i_L(0) = 0$ .

Получим напряжение на емкости и ток разряда:

$$u_C = \frac{U}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}), \quad i = \frac{U}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

В данном случае имеем две постоянные времени:  $\tau_1 = \frac{1}{|p_1|}$ ,  $\tau_2 = \frac{1}{|p_2|}$ .

В качестве постоянной времени, характеризующей длительность переходного процесса, принимают наибольшую из  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Если же  $R < R_{\text{кр}}$ , то возникает колебательный процесс (рис. 4.3, б). Тогда решение дифференциального уравнения имеет вид

$$u_C = \frac{U}{\sin \psi} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi); \quad i = \frac{U}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t,$$

где  $\delta = \frac{R}{2L}$ ,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ .

Постоянная времени вычисляется по формуле

$$\tau = \frac{1}{\delta} = \frac{2L}{R}.$$

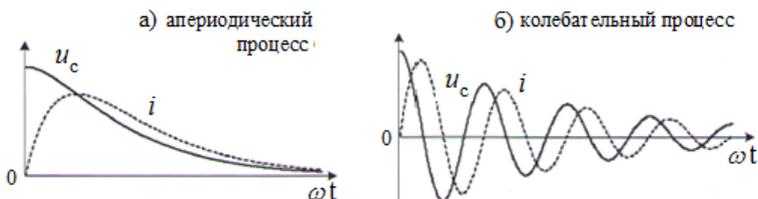


Рис. 4.3. Переходные процессы в  $RLC$ -цепи

В критическом случае при  $R = R_{\text{кр}}$  корни характеристического уравнения становятся одинаковыми и действительными (кратные корни). При кратных корнях общее решение дифференциального уравнения записывается в виде  $u_C = (A_1 + A_2 t)e^{pt}$ , где постоянные  $A_1$  и  $A_2$  определяются на основании законов коммутации. Напряжение на емкостном элементе и ток разряда в критическом случае таковы:

$$u_C = U \left( 1 + \frac{R}{2L} t \right) e^{-\frac{R}{2L} t}, \quad i = \frac{U}{L} t e^{-\frac{R}{2L} t}.$$

Постоянная времени  $\tau = \frac{2L}{R}$ .

При  $R = 0$  частота стремится к резонансной частоте  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , а затухание  $\delta$  — к нулю. В этом случае в цепи возникают незатухающие колебания.

### Задание на подготовку к выполнению экспериментальной части

Определите постоянную времени цепи и величину сопротивления резистора при критическом режиме переходного процесса  $RLC$ -цепи (рис. 4.1). Исходные данные определяются номером варианта и находятся в соответствующей строке табл. 4.1. Величины с одной звездочкой даны для студентов первой группы потока, с двумя звездочками — второй. Все расчетные данные цепи занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.1

## Исходные данные расчетной части

Номер варианта	$R_k$ , Ом	$L_k$ , мГн	$C^*$ , мкФ	$C^{**}$ , мкФ
1	64	33	0,22	1
2	64	33	0,47	1,22
3	64	33	0,69	1,47
4	128	66	1	0,22
5	128	66	1,22	0,47
6	128	66	1,47	0,69
7	188	100	1	0,47
8	188	100	1,22	0,69

Таблица 4.2

## Расчетные данные для экспериментального исследования

Режим $RLC$ -цепи	$R < 0,2R_{кр}$	$R = R_{кр}$	$R > 2R_{кр}$
Постоянная времени $\tau$ , мс			
Сопротивление добавочного резистора $R_d$ , Ом			
Частота следования импульсов $f$ (при $t_{и} = 5\tau$ ), Гц			
Название режима			

*Примечание.* Сопротивление добавочного резистора  $R_d$  устанавливается 2,2 Ом, если его расчетное значение оказывается отрицательным.

### Порядок выполнения экспериментальной части

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.
2. Соберите электрическую цепь  $RLC$  (рис. 4.1) и покажите её преподавателю или лаборанту. Значение сопротивления резистора  $R_d$  возьмите из табл. 4.2 для критического режима.
3. Установите на источнике напряжения однополярные прямоугольные импульсы частотой  $f$ , значение которой возьмите из табл. 4.2, и с максимальной амплитудой.
4. Подключите к выходу генератора импульсов осциллограф и настройте его так, чтобы на экране наблюдался один период прямоугольного напряжения. Зарисуйте форму и параметры прямоугольного напряжения.
5. Отсоедините осциллограф от генератора и, подключая его поочередно к трем участкам исследуемой электрической цепи, зарисуйте форму и параметры переходных напряжений.
6. Повторите эксперимент при значениях сопротивления резистора  $R < 0,2R_{кр}$  и  $R > 2R_{кр}$  (табл. 4.2).
7. Полученные в каждом опыте кривые напряжения перенесите в отчет и подпишите название режима. Убедитесь, что выполняются законы Кирхгофа и законы коммутации.
8. Используя графические результаты экспериментов, запишите аналитическое выражение переходного напряжения на конденсаторе цепи для случая  $R < 0,2R_{кр}$ .
9. По результатам физического эксперимента сделайте выводы.

### Определение коэффициентов уравнения переходного напряжения на элементах RLC-цепи при колебательном переходном процессе

Уравнение переходного напряжения имеет вид

$$u(t) = u_{np}(t) + A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_{св} t + \psi).$$

Пример кривой напряжения на конденсаторе, перенесенный с экрана осциллографа на кальку, приведен на рис. 4.4.

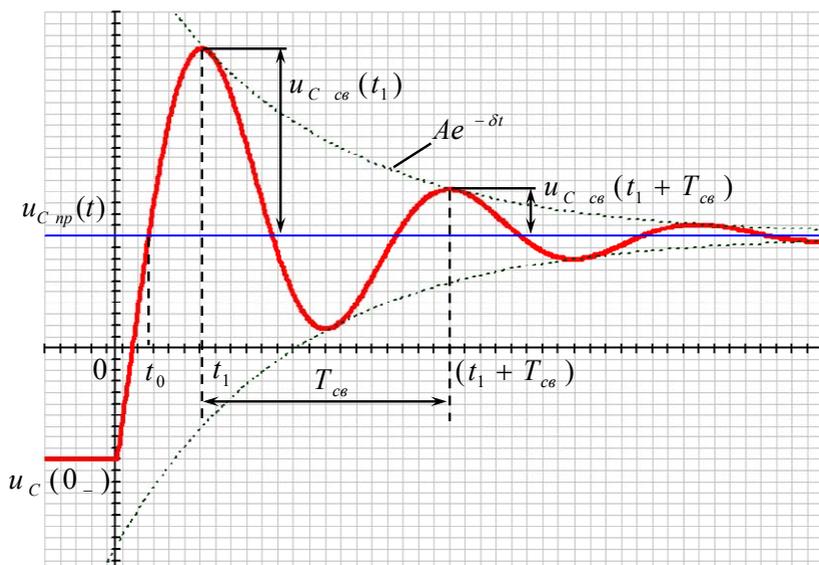


Рис. 4.4. Напряжение на конденсаторе при переходном колебательном процессе

Угловая частота свободных колебаний  $\omega_{св}$  определяется через период  $T_{св}$ , который измеряется с учетом масштаба по кривой напряжения  $u(t)$  (рис. 4.4):

$$\omega_{св} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{св}}.$$

Начальная фаза свободных колебаний  $\Psi$  определяется через время  $t_0$  (рис. 4.4):  $\Psi = \omega_{св} \cdot t_0$ .

Коэффициент затухания  $\delta$  определяется выражением

$$\delta = \frac{1}{T_{\text{св}}} \ln \frac{u_{\text{св}}(t_1)}{u_{\text{св}}(t_1 + T_{\text{св}})}.$$

Постоянная  $A$  определяется по мгновенному значению  $u_{\text{св}}(t)$  в момент времени  $t = t_1$ :  $A = u_{\text{св}}(t_1) \cdot e^{-\delta \cdot t}$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Какие виды корней может иметь характеристическое уравнение второго порядка?
2. Какой характер переходного процесса соответствует каждой паре корней характеристического уравнения второго порядка?
3. Что называется критическим сопротивлением цепи?
4. Чем определяется характер переходного процесса в электрических цепях второго порядка?

## Лабораторная работа 5

### Исследование пассивных четырехполюсников

**Цель работы** — изучение экспериментальных методов определения коэффициентов уравнений четырехполюсников.

#### Программа работы

1. Определить с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания коэффициенты уравнений исследуемого четырехполюсника.
2. Определить параметры элементов Т-схемы замещения исследуемого четырехполюсника.

#### Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе исследуется пассивный четырехполюсник, собранный по П-образной схеме. Входными для четырехполюсника являются зажимы 1-1', а выходными — зажимы 2-2'. Цепь питается от блока генератора напряжений, который формирует синусоидальное напряжение с изменяемой амплитудой и частотой. Для измерения напряжения и тока используется блок мультиметров, подключенный в режиме вольтметра и амперметра. Активная мощность в цепи измеряется ваттметром (рис. 5.1). Номинальное действующее значение напряжения  $U_H = 8 \text{ В}$ .

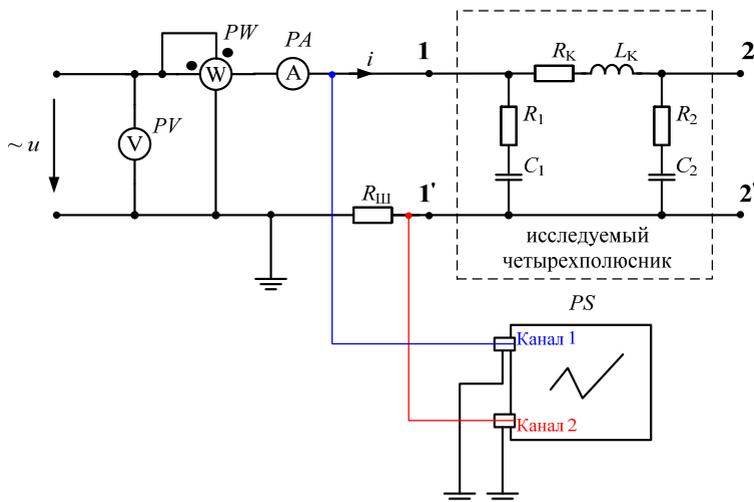


Рис. 5.1. Электрическая схема исследуемой цепи

Исследуемый четырехполюсник подключается к источнику питания через шунтовый резистор  $R_{\text{ш}} = 2,2 \text{ Ом}$ , который необходим для определения характера сопротивления четырехполюсника (активно-индуктивный или активно-емкостной). Знак угла сдвига фаз между синусоидами напряжения и тока определяется с помощью осциллографа *PS*. Комплексные сопротивления четырехполюсника относительно входных или выходных зажимов определяются косвенным путём, с помощью трех приборов: вольтметра, амперметра и ваттметра.

### Краткие теоретические сведения

Четырехполюсником называется любая электрическая цепь, имеющая два входных и два выходных зажима (рис. 5.2). Трансформатор, линию передачи энергии, мостовую схему и т. п. можно рассматривать как четырехполюсники. При прямом питании источник электрической энергии подключают к входным полюсам четырехполюсника, а к выходным – приемник электрической энергии или нагрузку.

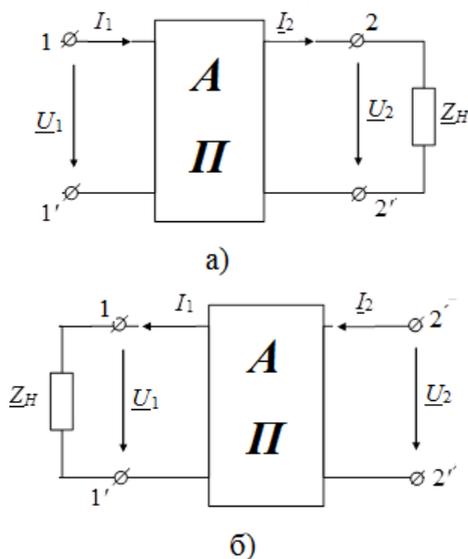


Рис. 5.2. Схема четырехполюсника:  
*a* – при прямом питании; *б* – при обратном питании

Четырехполюсники могут быть активными и пассивными. Если в четырехполюснике есть источники энергии, то такой четырехполюсник называют активным. Если нет ни одного источника энергии — это пассивный четырехполюсник. На схемах первый тип четырехполюсника обозначают буквой А в прямоугольнике, во втором случае — буквой П (рис. 5.2).

Четырехполюсник описывается двумя уравнениями, связывающими входные и выходные токи и напряжения. Одна из форм записи уравнений пассивного четырехполюсника, называемая А-формой, при прямом питании (рис. 5.2, а) имеет вид

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = A\underline{U}_2 + B\underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 = C\underline{U}_2 + D\underline{I}_2 \end{cases}.$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , или параметры четырехполюсника в цепи синусоидального тока, являются комплексными числами. В линейной цепи, подчиняющейся принципу взаимности, эти коэффициенты связаны соотношением

$$AD - BC = 1.$$

Значит, независимыми являются только три параметра из четырех.

При обратном питании (рис. 5.2, б) уравнения четырехполюсника приобретают вид

$$\begin{cases} \underline{U}_2 = D\underline{U}_1 + B\underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 = C\underline{U}_1 + A\underline{I}_1 \end{cases}.$$

В них коэффициенты  $A$  и  $D$  поменялись местами, следовательно, в симметричном четырехполюснике  $A = D$ .

Для того чтобы определить параметры четырехполюсника опытным путем, проделывают четыре опыта: холостого хода (1Х) и короткого замыкания (1К) при прямом питании, а также холостого хода (2Х) и короткого замыкания (2К) при обратном питании. В каждом из этих опытов измеряют напряжение, ток и мощность. Измерение мощности нужно для определения угла сдвига фаз из формулы  $P = UI \cos \varphi$ .

По опытным данным рассчитывают входные комплексные сопротивления четырехполюсника в каждом из этих режимов:  $Z_{1X}$  и  $Z_{1K}$  — при прямом питании,  $Z_{2X}$  и  $Z_{2K}$  — при обратном питании.

Зная сопротивления в режиме холостого хода и короткого замыкания, можно найти коэффициенты уравнений четырехполюсника:

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

Комплексный коэффициент  $\underline{A}$  имеет два значения, отличающиеся на  $\pi$ . При определении параметров схемы замещения необходимо проверить, какое значение соответствует характеру сопротивлений  $\underline{Z}$ .

Функция пассивного взаимного четырехполюсника как передаточного звена между источником питания и нагрузкой может выполняться в виде Т-образной схемы замещения (рис. 5.3).

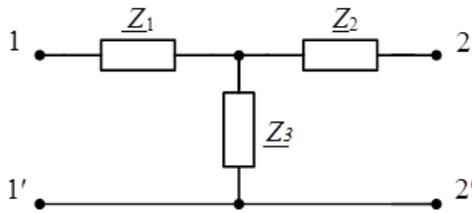


Рис. 5.3. Т-образная схема замещения четырехполюсника

Сопротивления Т-образной схемы замещения четырехполюсника по коэффициентам А-формы найдем по формулам:

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

Характеристические параметры:

– для симметричного четырехполюсника:

- характеристическое сопротивление

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}};$$

- постоянная передачи

$$g = \ln(\underline{A} + \sqrt{\underline{B} \cdot \underline{C}}) = \alpha + j\beta,$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\beta$  – коэффициент фазы;

– для несимметричного четырехполюсника:

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{A \cdot B}{C \cdot D}}, \quad \underline{Z}_{C2} = \sqrt{\frac{D \cdot B}{C \cdot A}};$$
$$g = \ln(\sqrt{A \cdot D} + \sqrt{B \cdot C}) = \alpha + j\beta.$$

### Порядок выполнения экспериментальной части

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.

2. Соберите исследуемую электрическую схему (рис. 5.1) и покажите её преподавателю или лаборанту. Значения элементов указаны в табл. 5.1. Величина частоты  $f$  генератора задается преподавателем в пределах 400...1800 Гц.

3. Включите блок генераторов синусоидальных напряжений и установите значение номинального напряжения  $U_H = 8$  В по вольтметру  $PV$ . Выполните опыты холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) со стороны вторичных зажимов 2-2', при этом измерьте напряжение, ток и активную мощность на входе цепи. Измеренные значения  $U_{1X}$ ,  $I_{1X}$ ,  $P_{1X}$  и  $U_{1K}$ ,  $I_{1K}$ ,  $P_{1K}$  занесите в табл. 5.1. **При измерении мощности следите за сигнализацией ошибок в выборе пределов измерения  $I>$ ,  $I<$ ,  $U>$ ,  $U<$ .**

4. В каждом опыте определите характер комплексного сопротивления четырехполюсника (активно-индуктивный или активно-емкостной) с помощью осциллографа  $PS$ . Фазовый сдвиг  $\varphi > 0$  для активно-индуктивной нагрузки,  $\varphi < 0$  для активно-емкостной.

5. Поменяйте местами входные и выходные зажимы четырехполюсника, т. е. подайте питание на зажимы 2-2' и проделайте опыты холостого хода и короткого замыкания на зажимах 1-1'. Измеренные значения  $U_{2X}$ ,  $I_{2X}$ ,  $P_{2X}$  и  $U_{2K}$ ,  $I_{2K}$ ,  $P_{2K}$  также занесите в табл. 5.1. Определите знак угла сдвига фаз между напряжением и током с помощью осциллографа  $PS$ .

6. По полученным экспериментальным данным рассчитайте комплексные сопротивления четырехполюсника  $\underline{Z}_{1X}$ ,  $\underline{Z}_{1K}$ ,  $\underline{Z}_{2X}$ ,  $\underline{Z}_{2K}$  и занесите их в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Экспериментальные и расчетные данные четырехполюсника

Экспериментальные данные				Расчётные данные		
Режим	$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт	$z$ , Ом	$\varphi$ , град	$\underline{Z}$ , Ом
ХХ 1						
КЗ 1						
ХХ 2						
КЗ 2						
Частота генератора $f = \dots$ Гц						
Параметры элементов: $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 47 + 47$ Ом, $C_1 = 1$ мкФ, $C_2 = 0,47$ мкФ, $L_k = 33$ мГн						

Комплексные сопротивления четырехполюсников определите так:

$$z = \frac{U}{I}, \quad \varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}, \quad \underline{Z} = z \cdot e^{j\varphi} = R + jx.$$

При корректных измерениях должно выполняться соотношение, вытекающее из принципа взаимности:  $\underline{Z}_{1X} / \underline{Z}_{1K} = \underline{Z}_{2X} / \underline{Z}_{2K}$ . Убедитесь в этом, прежде чем двигаться дальше.

7. Определите коэффициенты А-формы уравнений четырехполюсника и запишите систему уравнений. Для контроля правильности вычислений проверьте соотношение  $A \cdot D - B \cdot C = 1$ .

8. Изобразите Т-схему замещения четырехполюсника и определите параметры ее элементов.

9. Определите характеристические параметры четырехполюсника.

10. По результатам физического эксперимента сделайте выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что называют четырехполюсником? Что можно отнести к четырехполюсникам?
2. Какие формы записи уравнений четырехполюсника существуют?
3. Как можно определить коэффициенты A-, Z-, Y-формы записи четырехполюсника опытным путем?
4. Какими схемами замещения могут быть представлены пассивные четырехполюсники?
5. Что относят к первичным параметрам четырехполюсника? Какие параметры считаются вторичными?
6. Какой четырехполюсник является симметричным?

## Лабораторная работа 6

### Исследование распределения напряжения вдоль однородной длинной линии

**Цель работы** — изучение процессов в электрических цепях с распределенными параметрами в режиме с гармоническими колебаниями.

#### Программа работы

1. Экспериментально снять распределение действующего значения напряжения вдоль однородной длинной линии при холостом ходе, коротком замыкании и в согласованном режиме.
2. Получить расчетным путем графики распределения напряжения однородной длинной линии при холостом ходе, коротком замыкании и в согласованном режиме.
3. Отобразить на одном графике зависимости распределения напряжения от длины однородной линии, полученные экспериментально и при помощи расчета.

#### Описание лабораторной установки

Модель однородной длинной линии представляет собой цепную схему из семнадцати симметричных одинаковых П-образных четырёхполюсников (рис. 6.1). Номинальные параметры звеньев указаны на лицевой панели. В начале цепной схемы и в конце её имеются дополнительные гнезда для подключения амперметров, токоограничивающих резисторов, нагрузок. Для этой цели можно использовать также наборное поле блока генераторов напряжений.

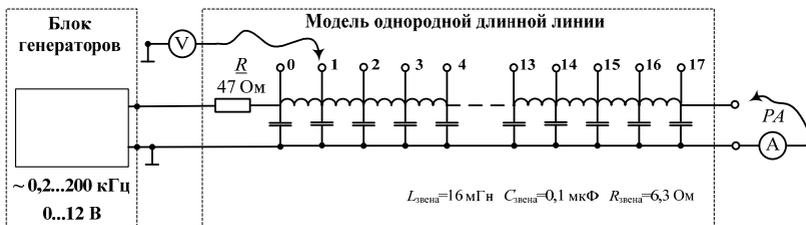


Рис. 6.1. Электрическая схема исследуемой цепи

## Краткие теоретические сведения

Длинная линия для передачи электрической энергии представляет собой электрическую цепь с распределенными параметрами, в которой магнитные и электрические поля распределены вдоль цепи и преобразование магнитной энергии в тепло происходит вдоль всей цепи.

Такие цепи характеризуются четырьмя параметрами: продольным активным сопротивлением  $R_0$ , индуктивностью  $L_0$ , емкостью  $C_0$ , поперечной проводимостью  $G_0$ , — отнесенными к единице длины линии. Эти параметры называются первичными параметрами. Поперечная проводимость не является обратной величиной продольного сопротивления. Для цепи с распределенными параметрами характерно непрерывное изменение напряжения и тока как по величине, так и по фазе при переходе от точки к точке вдоль линии цепи.

В цепях с распределенными параметрами напряжение и ток в любом пункте линии и в любой момент времени определяются как результат наложения падающей и отраженной волн напряжения и тока. Распространение падающей и отраженной волны напряжения (тока) по данной линии определяется вторичными или волновыми параметрами: волновым сопротивлением и коэффициентом распространения, которые зависят от первичных параметров.

Волновое сопротивление имеет размерность сопротивления и находится по формуле

$$Z_B = \sqrt{\frac{R_0 - j\omega L_0}{G_0 - j\omega C_0}}.$$

Волновое сопротивление для линии синусоидального тока без учета потерь ( $R_0 = G_0 = 0$ )

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Коэффициентом распространения принято называть комплексное число

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)},$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания, Нп/км;  $\beta$  — коэффициент фазы, рад/км.

Для линии синусоидального тока без учёта потерь ( $R_0 = G_0 = 0$ )

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{L_0C_0}.$$

Уравнения линии без потерь, записанные по концу линии, при синусоидальном режиме имеют вид

$$\begin{cases} \underline{U}(x') = \underline{U}_2 \cdot \cos\beta x' + jZ_B \underline{I}_2 \sin\beta x'; \\ \underline{I}(x') = \underline{I}_2 \cdot \cos\beta x' + j\frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin\beta x', \end{cases}$$

где  $x'$  — расстояние, отсчитываемое от конца линии, км.

Характерными режимами работы линии являются холостой ход ( $Z_H = \infty$ ), короткое замыкание ( $Z_H = 0$ ), согласованная нагрузка ( $Z_H = Z_B$ ), произвольная нагрузка ( $Z_H$ ).

В линиях без потерь при холостом ходе и коротком замыкании возникают стоячие электромагнитные волны.

Стоячие волны в линии без потерь при холостом ходе ( $I_2 = 0$ ) описываются уравнениями

$$\begin{cases} \underline{U}(x') = \underline{U}_2 \cdot \cos\beta x'; \\ \underline{I}(x') = j\frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin\beta x'. \end{cases}$$

Стоячие волны в линии без потерь при коротком замыкании ( $U_2 = 0$ ) на конце линии можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} \underline{U}(x') = jZ_B \underline{I}_2 \sin\beta x'; \\ \underline{I}(x') = \underline{I}_2 \cdot \cos\beta x'. \end{cases}$$

Напряжение и ток при согласованной нагрузке с учетом потерь определяются так:

$$\begin{cases} \underline{U}(x') = \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma \cdot x'} = \underline{U}_2 \cdot e^{\alpha \cdot x'} \cdot e^{j\beta \cdot x'}; \\ \underline{I}(x') = \underline{I}_2 \cdot e^{\gamma \cdot x'} = \underline{I}_2 \cdot e^{\alpha \cdot x'} \cdot e^{j\beta \cdot x'}. \end{cases}$$

При согласованной нагрузке в линии будут распространяться только падающие волны напряжения и тока. Во всех остальных случаях кроме падающих волн будут также и отраженные волны напряжения и тока. Наличие отраженных волн обуславливает появление максимумов и минимумов в распределении напряжения и тока вдоль линии.

Характерные графики распределения напряжения вдоль линии при режимах холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки представлены на рис. 6.2.

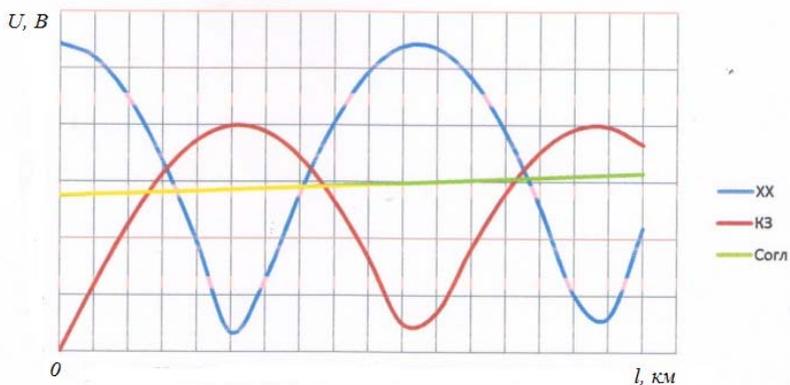


Рис. 6.2. Графики распределения напряжения вдоль линии при различных режимах

### Порядок выполнения экспериментальной части

1. Соберите цепь в соответствии с рис. 6.1 сначала без сопротивлений нагрузки (режим холостого хода). На входе линии включите токоограничивающее сопротивление  $47 \text{ Ом}$ , а в конце — только вольтметр.

2. Включите генератор и установите частоту  $1000 \dots 1500 \text{ Гц}$  максимальной амплитуды.

3. В режиме холостого хода измерьте напряжения во всех точках от конца до начала линии и занесите результаты в табл. 6.1.

4. Повторите опыт при коротком замыкании в конце линии и при согласованной нагрузке. В режиме короткого замыкания дополнительно измерьте ток на выходе линии. Согласованная нагрузка  $400 \text{ Ом}$  набирается из трёх сопротивлений ( $330 + 47 + 22 \text{ Ом}$ ) или используется переменный резистор  $1 \text{ кОм}$ , который устанавливается на наборной панели.

5. Постройте графики распределения напряжения вдоль линии (рис. 6.3).

6. Рассчитайте распределение напряжения вдоль линии в этих трёх режимах по формулам, приведенным в разделе «Краткие теоретические сведения», и на рис. 6.3 постройте расчётные графики. Сравните их с опытными графиками и объясните результаты расхождения.

Таблица 6.1

Экспериментальные и расчетные данные длинной линии

Номер точки измерения	$x'$ , км	Опытные $U$ , В			Расчётные $U$ , В		
		XX	КЗ	$Z_H = Z_C$	XX	КЗ	$Z_H = Z_C$
0	204						
1	192						
2	180						
3	168						
4	156						
5	144						
6	132						
7	120						
8	108						
9	96						
10	84						
11	72						
12	60						
13	48						
14	36						
15	24						
16	12						
17	0						

Ток короткого замыкания на выходе линии  $I_2 = \dots$  мА.

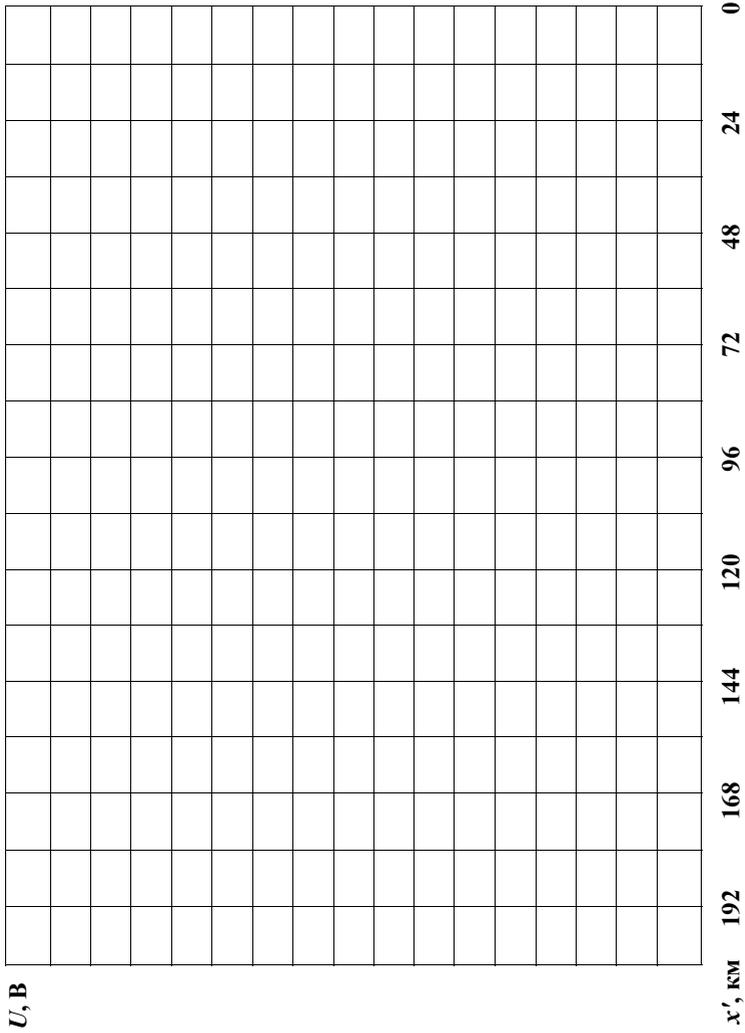


Рис. 6.3. Графики  $U = f(x')$

## Расчет параметров исследуемой однородной длинной линии

Длина воздушной линии без потерь, соответствующая одному звену, км,

$$l_{зв} = c \sqrt{L_{зв} C_{зв}} = 3 \cdot 10^5 \sqrt{16 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 12,$$

где  $c = 3 \cdot 10^5$  км/с.

Длина всей заданной линии  $l = 12 \cdot 17 = 204$  км.

Волновое сопротивление линии, Ом,

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_{зв}}{C_{зв}}} = \sqrt{\frac{16 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot 10^{-6}}} = 400.$$

Частота, при которой длина волны равна длине линии 204 км, Гц,

$$f = \frac{1}{17 \sqrt{L_{зв} \cdot C_{зв}}} = 1470.$$

Коэффициент распространения при этой частоте с учётом потерь

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{12} \sqrt{(R_{зв} + j\omega L_{зв}) \cdot j\omega C_{зв}} = \\ &= \frac{1}{12} \sqrt{(6,3 + j2\pi \cdot 1470 \cdot 16 \cdot 10^{-3}) \cdot j2\pi \cdot 1470 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = \\ &= \alpha + j\beta = 0,655 \cdot 10^{-3} - j \cdot 30,75 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

При этом затухание на всей длине линии составляет

$$e^{-\alpha l} = e^{-0,665 \cdot 10^{-3} \cdot 204} = 0,875 \text{ Нп/км},$$

а поворот фазы

$$\beta \cdot l = 30,75 \cdot 10^{-3} \cdot 204 = 6,273 \text{ рад} \cong 2\pi.$$

Коэффициент фазы для линии без учёта потерь

$$\beta = \omega \frac{1}{12} \sqrt{L_{зв} \cdot C_{зв}} = \omega \frac{1}{12} \sqrt{16 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = \omega \cdot 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ рад/км}.$$

### **Контрольные вопросы**

1. При каком условии четырехполюсник должен быть представлен цепью с распределенными параметрами?
2. Что относят к первичным параметрам длинной линии? Какие параметры относят ко вторичным?
3. Каков физический смысл постоянной распространения и волнового сопротивления?
4. Зависят ли вторичные параметры длинной линии от длины самой линии?
5. Как определить вторичные параметры длинной линии опытным путем?
6. Почему расчетные и экспериментальные графики распределения напряжения вдоль линии не совпадают?
7. В чем различие между бегущей и стоячей волной длинной линии?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», «Электроника и микроэлектроника» / С.М. Аполлонский, А.Л. Виноградов. — Москва : Кнорус, 2016. — 248 с. — ISBN 978-5-406-03879-6.
2. Введение в теоретическую электротехнику : курс подготовки бакалавров : учеб. пособие / Ю.А. Бычков [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 288 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-2406-1.
3. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей : учебник / Г.И. Атабеков. — Изд. 4-е, стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 424 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-0699-9.
4. Белецкий, А.Ф. Теория линейных электрических цепей : учебник / А.Ф. Белецкий. — Изд. 3-е, стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 544 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-0905-1.
5. Рыбков, И.С. Электротехника : учеб. пособие / И.С. Рыбков. — Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2017. — 160 с. — (Высшее образование. Бакалавриат). — ISBN 978-5-369-00144-8.
6. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники : практикум : учеб. пособие / С.М. Аполлонский. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 320 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-2543-3.

**Форма отчета по лабораторной работе**

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»  
Институт химии и энергетики  
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

**Отчет по лабораторной работе № \_\_\_**

---

(название лабораторной работы)

Выполнил студент группы

Проверил преподаватель

Тольятти 20\_\_

## **Цель работы —**

### **Программа работы**

- 1.
- 2.
- 3.
- ...

### **Описание лабораторной установки**

Приводится электрическая схема исследуемой цепи (*может быть одна или несколько*), измеряемые величины, их метрологическое обеспечение, ссылки на нормативные источники и методические указания.

### **Индивидуальная расчетная часть**

Индивидуальную расчетную часть выполняет каждый студент в соответствии с заданным вариантом. Она содержит исходные данные, схемы, системы уравнений, расчетные формулы, записанные в общем виде и с числовыми значениями, потенциальные и векторные диаграммы расчётной электрической цепи.

### **Расчетные и экспериментальные данные**

Этот раздел содержит таблицы с результатами индивидуального расчета и данные, полученные в ходе эксперимента.

### **Результаты эксперимента**

Данный раздел включает результаты обработки экспериментальных данных, сопровождаемые необходимыми расчетными формулами и таблицами; при необходимости строятся графики зависимостей, потенциальные и векторные диаграммы электрической цепи.

### **Выводы по работе**

Выводы записываются по результатам экспериментов в соответствии с целью работы.

### Описание блоков учебного комплекта

Комплект лабораторного оборудования «Электрические и магнитные цепи» предназначен для проведения лабораторного практикума по дисциплине «Теоретические основы электротехники». Позволяет исследовать линейные и нелинейные электрические и магнитные цепи при различных воздействиях в статических и динамических режимах.

Комплект лабораторного оборудования состоит из следующих блоков:

- однофазный источник питания;
- блок генераторов напряжений;
- наборная панель;
- набор мини-блоков;
- блок мультиметров;
- ваттметр;
- электронный осциллограф;
- соединительные провода и перемычки, питающие кабели.

#### Однофазный источник питания (218.9)

##### *Назначение*

Предназначен для питания однофазным переменным током промышленной частоты функциональных блоков учебного лабораторного комплекса. Основные параметры блока отображены в табл. П1.

Таблица П1

##### Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Электропитание от однофазной сети переменного тока с нулевым и защитным проводниками:	
— напряжение, В	$220 \pm 22$
— ток, А, не более	16
— частота, Гц	$50 \pm 0,5$

Параметр блока	Значение параметра
Выходные: – напряжение, В – ток, А, не более	$220 \pm 22$ 16
Устройства защиты	Автоматический выключатель, устройство защитного отключения (УЗО) с током срабатывания 10 мА

### ***Устройство и принцип действия***

Конструктивно источник выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений источника. На панели размещены два однофазных автоматических выключателя, устройство защитного отключения, сигнальный светодиод и три штепсельные розетки с заземляющими контактами. На кожухе с тыльной стороны расположены приборные однофазные вилка и три розетки с заземляющими контактами.

Работа источника основана на передаче электрической энергии с его входа на выходы к потребителям с обеспечением защиты от сверхтоков и нарушения изоляции.

### ***Внешний вид и порядок работы***

Порядок работы:

- включите автоматический выключатель источника и устройство защитного отключения, если оно отключено;
- для снятия выходных напряжений (отключения) источника отключите его автоматический выключатель.

Внешний вид блока в отключенном состоянии представлен на рис. П1, в состоянии «включено» – на рис. П2.



Рис. П1. Состояние блока «выключено»

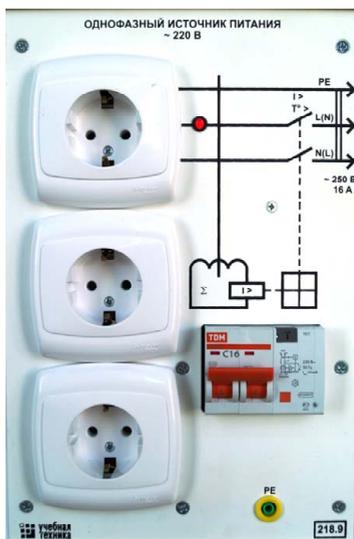


Рис. П2. Состояние блока «включено»

## Блок генераторов напряжений (212.6)

### Назначение

Предназначен для формирования однофазных регулируемых сигналов различной формы, трехфазного синусоидального напряжения и постоянных напряжений для питания исследуемых схем. Основные параметры блока отображены в табл. П2.

Таблица П2

### Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Выходное напряжение нерегулируемых источников питания: — положительной полярности, В — отрицательной полярности, В Ток от перегрузки по току, А	+15 ± 0,3 -15 ± 0,3 0,2
Выходное напряжение регулируемых источников питания, В Ток от перегрузки по току, А	-13... 0 ... +13 0,2

Параметр блока	Значение параметра
Виды сигналов на выходе однофазного генератора	Синусоидальный Прямоугольный двухполярный Прямоугольный униполярный Пилообразный двухполярный
Диапазон изменения амплитуды выходного напряжения однофазного генератора, В	0...12
Диапазон изменения частоты синусоидального и пилообразного сигналов	0,2 Гц ... 200 кГц
Диапазон изменения частоты прямоугольных сигналов	0,2 Гц ... 100 кГц
Генератор трехфазного напряжения: — количество выходов — частота выходного напряжения, Гц — амплитуда выходного напряжения, В	3 50 ± 1 12 ± 0,5

### *Внешний вид*

Конструктивно источник выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема и названия основных органов управления и защиты (рис. П3):

1 – выключатель «Сеть» подачи питания на блок;  
2 – предохранитель в цепи питания блока;  
3 – генератор напряжений специальной формы;  
4 – кнопка «Форма», изменяющая форму напряжения на выходе генератора. Горящий светодиод показывает выбранную форму выходного сигнала;

5 – светодиоды, показывающие форму сигнала на выходе генератора. Горящее/мигающее состояние светодиода показывает, как будет изменяться выходная частота при повороте ручки энкодера-потенциометра;

6 – ручка энкодера-потенциометра, позволяющая изменять выходную частоту генератора. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра;

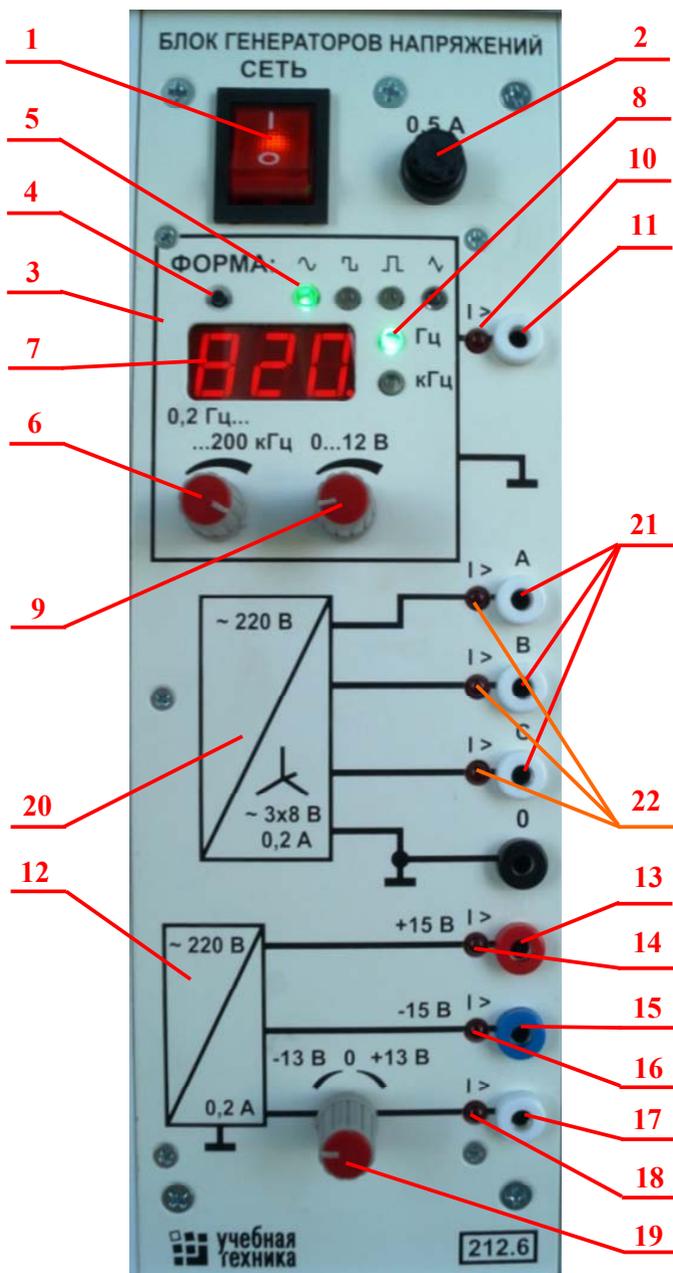


Рис. ПЗ. Внешний вид блока генераторов

- 7 – индикатор частоты генератора;
- 8 – светодиоды, показывающие размерность установленной частоты генератора;
- 9 – ручка потенциометра регулировки выходного напряжения генератора;
- 10 – светодиод, показывающий перегрузку выхода генератора по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 11 – выход генератора напряжений специальной формы;
- 12 – генератор постоянных напряжений;
- 13 – выходное гнездо источника питания +15 В;
- 14 – светодиод, показывающий перегрузку источника +15 В по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 15 – выходное гнездо источника питания –15 В;
- 16 – светодиод, показывающий перегрузку источника –15 В по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 17 – выходное гнездо регулируемого источника питания –13...0...+13 В;
- 18 – светодиод, показывающий перегрузку регулируемого источника питания по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 19 – ручка потенциометра регулировки выходного напряжения регулируемого источника питания;
- 20 – генератор трехфазного напряжения с действующим значением выходного напряжения 8 В;
- 21 – выходные гнезда генератора трехфазного напряжения (фазы А, В, С и 0);
- 22 – светодиоды в цепях фазных напряжений трехфазного генератора, показывающие перегрузку соответствующей фазы по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 23 – разъём подключения сетевого напряжения и заземления блока (на задней крышке блока).

### ***Порядок работы***

1. Включите автоматический выключатель «Сеть» 1. При наличии перегрузки или короткого замыкания в соответствующей цепи загорается светодиод перегрузки I >. Устраните причину перегрузки или короткого замыкания и дождитесь, пока соответствующий светодиод погаснет. Генератор напряжения снова находится в рабочем состоянии.
2. Регулировку выходной частоты генератора напряжений специальной формы производит энкодер-потенциометр б.
3. При повороте ручки энкодера меняется выходная частота, и ее величина отображается на индикаторе 7 с размерностью, показываемой светодиодами 8.
4. Переключение формы выходного напряжения производится путем нажатия на кнопку «Форма» 4. При этом соответствующий светодиод 5 показывает форму выходного напряжения (мнемосхема формы выходного сигнала нанесена над светодиодом).
5. Ручкой потенциометра 8 производится регулировка амплитуды выходного напряжения генератора специальной формы.
6. Регулировка величины выходного напряжения регулируемого генератора постоянного напряжения производится ручкой потенциометра 19.
7. Выключение генератора напряжений производится выключателем «Сеть» по окончании проведения экспериментов.

### **Наборная панель (305)**

#### ***Назначение***

Предназначена для установки и соединения между собой мини-блоков при построении исследуемых электрических и электронных цепей.

#### ***Внешний вид и порядок работы***

Конструктивно панель выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений панели и в соответствии с ней размещены соединительные гнезда (рис. П4).

Электрический контакт мини-блоков и проводников осуществляется путем введения контактных штырей последних в гнезда панели.

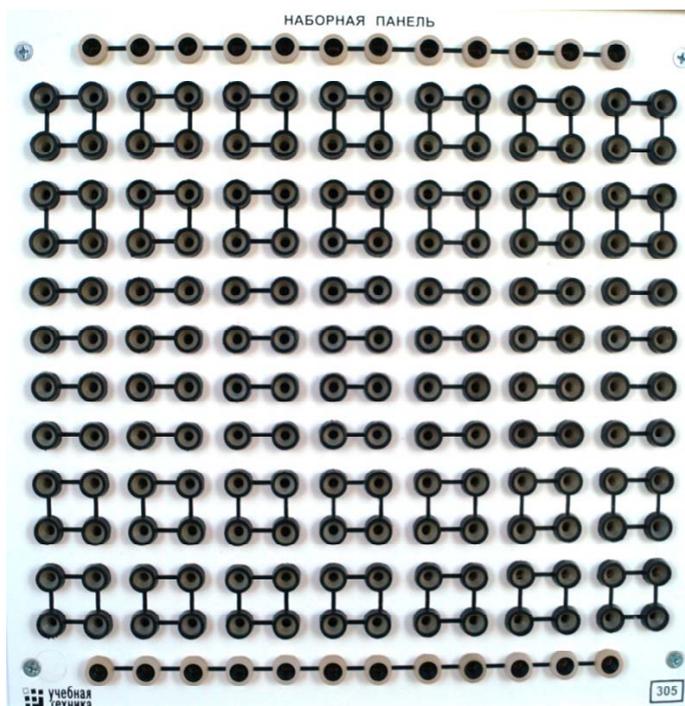


Рис. П4. Внешний вид наборной панели

### **Набор мини-блоков (600.17)**

#### *Назначение*

Предназначен для построения электрических и электронных цепей.

#### *Устройство и принцип действия*

Конструктивно набор выполнен в виде панели с установленными на ней мини-блоками. Мини-блоки представляют собой отдельные радиоэлементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т. п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые мини-блоки содержат несколько элементов, соединённых между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их

соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Мини-блоки хранятся в специальном контейнере.

### Внешний вид

Общий вид контейнера с мини-блоками представлен на рис. П5.

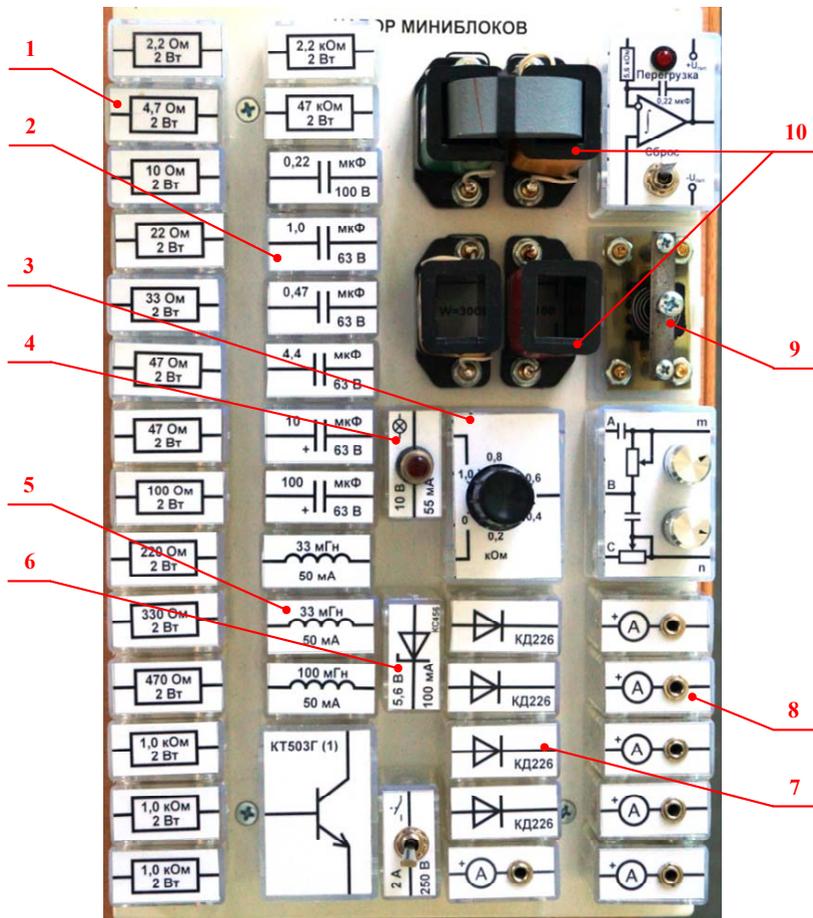


Рис. П5. Внешний вид набора мини-блоков

Характеристики одноэлементных мини-блоков:

1 – резисторы МЛТ, мощность 2 Вт, погрешность сопротивления  $\pm 5\%$ , номиналы: 2,2 Ом, 4,7 Ом, 10 Ом, 22 Ом, 33 Ом, 47 Ом, 100 Ом, 220 Ом, 330 Ом, 470 Ом, 1 кОм, 2,2 кОм, 47 кОм;

2 – конденсаторы, тип К73-17, напряжением 63...100 В, номиналы: 0,22 мкФ, 0,47 мкФ, 1 мкФ, 4,4 мкФ, полярный 10 мкФ, полярный 100 мкФ;

3 – потенциометр, тип СП4-2М, номинал 1 кОм;

4 – лампа сигнальная СМН-10-55;

5 – индуктивности, ток 50 мА, номиналы: 33 мГн, 100 мГн;

6 – стабилитрон, тип КС456А, номинальный ток 100 мА, номинальное напряжение 5,6 В;

7 – диоды, тип КД 226(1N5408), номинальный прямой ток 1 А, номинальное обратное напряжение 100 В;

8 – мини-блоки «амперметр» (6 шт.) позволяют подключать амперметр в различные ветви исследуемой электрической цепи без разборки схемы. Их устанавливают в наборную панель в тех местах схемы, где требуется измерить токи. В крышку мини-блока встроено гнездо коаксиального разъёмного соединителя, а к амперметру подсоединяется кабель с соответствующим штырём;

9 – мини-блок «магнитная цепь» (рис. П6) представляет собой трансформатор с регулируемым зазором в магнитопроводе. Магнитопровод выполнен из двух Ш-образных ферритовых сердечников марки М2000НМ. На среднем стержне магнитопровода расположены две одинаковые обмотки (намагничивающая и измерительная) по 200 витков каждая. Зазор может регулироваться винтом, один оборот которого изменяет зазор на 0,5 мм (шаг резьбы 0,5 мм). Для устранения перекоса сердечника рекомендуется в левый и правый зазоры вставить немагнитные прокладки (например, полоски бумаги) и осторожно от руки затянуть винт. Подойдёт бумага «Снегурочка» для офисной техники (толщина 0,1 мм), газетная бумага (0,05...0,06 мм).

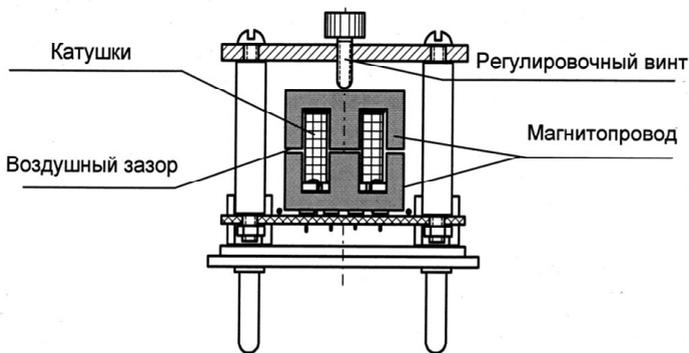


Рис. П6. Конструкция мини-блока «Магнитная цепь»

Будьте осторожны: большое усилие при затягивании винта может привести к разлому печатной платы, на которой смонтирована вся конструкция!

Необходимые для расчёта размеры сердечника и кривая намагничивания феррита М2000НМ приведены в описании экспериментов с этим мини-блоком;

10 — мини-блок «трансформатор» выполнен на разъёмном U-образном сердечнике из листовой электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На сердечнике установлены катушки по 900 и 300 витков и имеются две сменные катушки по 300 и 100 витков. Катушки легко переставляются в ходе лабораторной работы. Номинальные параметры трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. П3.

Таблица П3

Номинальные параметры трансформаторов

$W$	$U_H, В$	$I_H, мА$	$R, Ом$	$S_H, В \cdot А$
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

## Блок мультиметров (509.2.1)

### *Назначение*

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Основные параметры блока приведены в табл. П4.

Таблица П4

### Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Электропитание от однофазной сети переменного тока с нулевым и защитным проводниками: — напряжение, В — частота, Гц	$220 \pm 22$ $50 \pm 0,5$
Потребляемая мощность, В · А, не более	20
Тип мультиметра	МУ60

### *Устройство и принцип действия*

Конструктивно блок мультиметров выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели закреплены мультиметры, сетевой выключатель и держатели с предохранителями. На верхней боковой грани кожуха расположена вилка для присоединения шнура питания.

### *Внешний вид и порядок работы*

Общий вид блока представлен на рис. П7. В нём установлены два серийно выпускаемых мультиметра МУ60. Подробная техническая информация о них и правила применения приводятся в руководстве по эксплуатации, приложенном заводом-изготовителем. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

- не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы;

- когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину;
- перед тем как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи;
- не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение;
- не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены;
- будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения, имеющихся в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.



Рис. П7. Общий вид блока мультиметров

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: — V, ~ V, — A, ~ A или  $\Omega$ ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. П8.

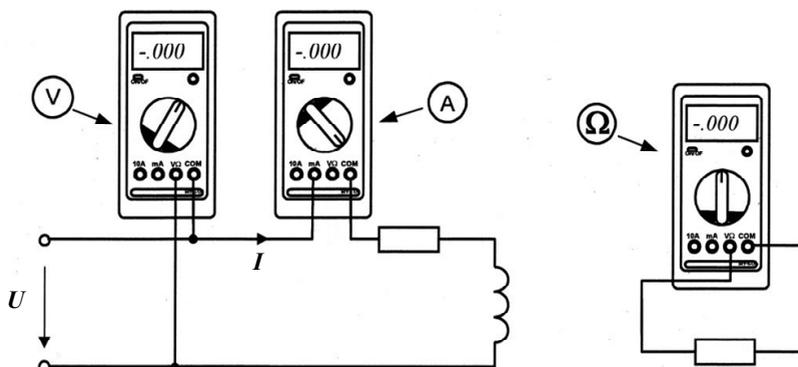


Рис. П8. Подключение мультиметра в электрическую цепь

Порядок работы:

- 1) включите выключатель «Сеть»;
- 2) включите используемые в эксперименте мультиметры;
- 3) с помощью переключателей мультиметров устанавливайте пределы и виды измеряемых параметров;
- 4) отсчет показаний производите с дисплеев мультиметров. Включите выключатель «Сеть»;
- 5) для выведения блока мультиметров из работы отключите выключатель «Сеть».

## Блок «ваттметр» (511)

### *Назначение*

Предназначен для измерения активной мощности в цепях постоянного и переменного тока. Основные параметры блока отображены в табл. П5.

Таблица П5

### Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Электропитание от однофазной сети переменного тока с нулевым и защитным проводниками: – напряжение, В – частота, Гц	$220 \pm 22$ $50 \pm 0,5$
Потребляемая мощность, В · А, не более	20
Пределы измерения: – напряжение (постоянное/переменное), В – ток (постоянный/переменный), А – частота тока/напряжения, Гц	$0...5/50$ $0...0,04/0,4$ $0...20000$
Пределы измерения активной мощности, Вт	$0...20$
Погрешность измерения, %, не более	$\pm 2,5$

### *Устройство и принцип действия*

Конструктивно ваттметр выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая схема соединений ваттметра и в соответствии с ней размещены гнезда для присоединения внешних устройств. На ней также размещены LED-индикатор, выключатель сетевого питания, держатель с предохранителем, переключатели пределов измерения напряжения и тока, светодиоды, сигнализирующие о выходе напряжения и тока за пределы измерения.

Работа ваттметра основана на перемножении мгновенных значений тока и напряжения и отображении среднего значения этого произведения на LED-дисплее прибора в цифровом виде.

*Внешний вид и порядок работы*

Внешний вид блока представлен на рис. П9.

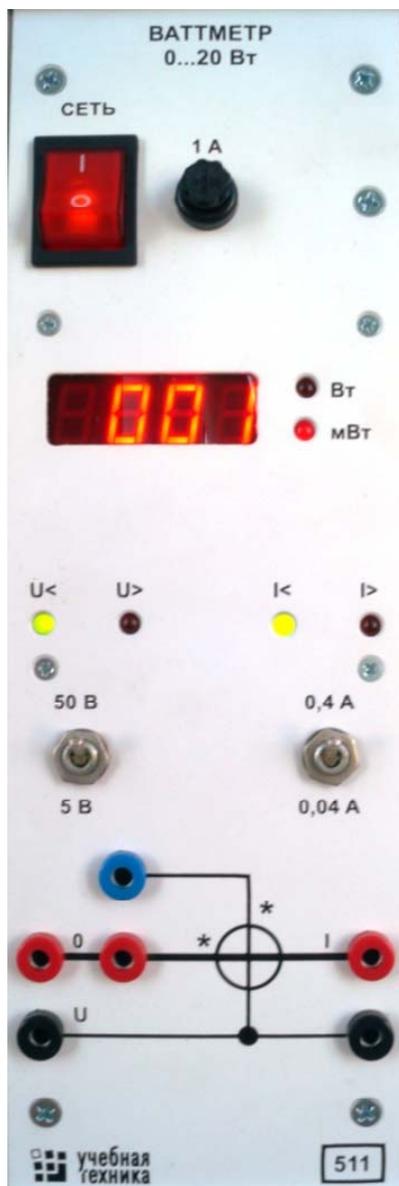


Рис. П9. Внешний вид блока «ваттметр»

Порядок работы:

- 1) включите прибор в электрическую цепь согласно приведённой на лицевой панели схеме. Для измерения активной мощности гнёзда, помеченные символом «•», должны быть соединены перемычкой;
- 2) включить выключатель «Сеть» и установить необходимые пределы измерения по току и по напряжению тумблерами. Если выбран заниженный предел измерения, то включается сигнализация перегрузки  $I >$  или (и)  $U >$ . Если, наоборот, предел завышен, то включается сигнализация  $I <$  или (и)  $U <$ ;
- 3) отсчитайте показания на LED-индикаторе. Следует помнить, что справа от окошка цифровых индикаторов включаются автоматически светодиоды сигнализации размерности Вт или мВт;
- 4) для выведения блока «ваттметр» из работы отключите выключатель «Сеть».