

Научно-производственное предприятие
«Учебная техника – Профи»

\

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

Методические указания

Челябинск
2009 г.

Бородянко В.Н., Гельман М.В., Непопалов В.Н., Шульдяков В.В. Электрические цепи и основы электроники: Методические указания к проведению лабораторных работ на минимодульном стенде «Электрические цепи и основы электроники». – Челябинск: ЮУрГУ, 2008.

Методические указания предназначены для студентов средних и высших учебных заведений, в которых предусмотрено изучение курса «Электротехника основы электроники». Методические указания также могут быть использованы для обучения учащихся профессионально-технических училищ и слушателей отраслевых учебных центров повышения квалификации инженерно-технических работников.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Описание стенда и общие рекомендации по осуществлению лабораторного эксперимента	4
1.1. Комплект минимодулей	4
1.2. Описание моноблока	5
1.3. Цель лабораторных занятий	6
1.4. Подготовка к лабораторному занятию	7
1.5. Проведение эксперимента	7
1.6. Обработка результатов и оформление отчета	11
2. Методические указания к проведению лабораторных работ по разделу «Электрические цепи»	14
2.1. Электрические цепи постоянного тока. Краткие теоретические сведения	14
Работа № 1-1. Электроизмерительные приборы и измерения	19
Работа № 1-2. Простейшие линейные электрические цепи постоянного тока	21
Работа № 1-3. Разветвленная линейная электрическая цепь постоянного тока	23
Работа № 1-4. Нелинейная цепь постоянного тока с последовательным соединением элементов	25
Работа № 1-5. Разветвленная нелинейная электрическая цепь постоянного тока	27
Работа № 1-6. Сложная линейная цепь постоянного тока	31
2.2. Электрические цепи переменного тока. Краткие теоретические сведения	33
Работа № 2-1. Экспериментальное определение параметров элементов цепей переменного тока	46
Работа № 2-2. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов	48
Работа № 2-3. Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением элементов	51
Работа № 2-4. Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «звезда»	54
Работа № 2-5. Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «треугольник»	57
Работа № 2-6. Нелинейная цепь переменного тока	60
Работа № 2-7. Однофазный трансформатор	63
3. Методические указания к проведению лабораторных работ по разделу «Основы электроники»	65
Работа №3-1. Исследование диодов	65
Работа №3-2. Исследование биполярного транзистора	68
Работа №3-3. Исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе	71
Работа №3-4. Исследование полевого транзистора	74
Работа №3-5. Исследование тиристорov	77
Работа №3-6. Исследование работы транзисторов в ключевом режиме	82
Работа №3-7. Исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителя	84
Работа №3-8. Исследование интегратора и активного фильтра	88
Работа №3-9. Исследование компараторов	92
Работа №3-10. Исследование мультивибраторов	94
Работа №3-11. Исследование цифровых интегральных микросхем	97
Работа №3-12. Исследование однополупериодного неуправляемого выпрямителя	100
Работа №3-13. Исследование однополупериодного управляемого выпрямителя	103
Работа №3-14. Исследование однофазной мостовой схемы выпрямления	106
Работа №3-15. Исследование трехфазных схем выпрямления	109
Работа №3-16. Исследование сглаживающих фильтров	113
Работа №3-17. Исследование параметрического стабилизатора напряжения	116
Работа №3-18. Исследование самовосстанавливающегося предохранителя	119

1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении лабораторных работ используется моноблок «Электрические цепи и основы электроники» и комплект минимодулей.

1.1. Комплект минимодулей

Лабораторные минимодули позволяют набрать электрические схемы для проведения лабораторных работ по электрическим цепям и электронике.

№	Наименование	Элемент	кол-во, шт.
1.	Диод выпрямительный	1N4007	2
2.	Диод Шоттки	1N5819	1
3.	Стабилитрон	KC147A	1
4.	Двуханодный стабилитрон	KC162A	1
5.	Светодиод	L5013+KC133A	1
6.	Самовосстанавливающийся предохранитель	RXE005	1
7.	Резисторы С2-33, мощность не менее 1 Вт	1 Ом	3
8.		10 Ом	1
9.		22 Ом	1
10.		47 Ом	1
11.		68 Ом	1
12.		82 Ом	1
13.		100 Ом	1
14.		120 Ом	1
15.		150 Ом	3
16.		330 Ом	1
17.		680 Ом	1
18.		1 кОм	1
19.		1,5 кОм	1
20.		10 кОм	3
21.		200 кОм	1
22.	Резистор переключаемый	10...470 кОм	1
23.	Потенциометры	ППБ-2А-150 Ом	1
24.		ППБ-2А-2,2 кОм/1,5 кОм	1
25.		ППБ-2А-10 кОм	1
26.	Конденсаторы	NP-22мкФх35В	1
27.		NP-220мкФх25В	1
28.		0,1 мкФ	1
29.		1 мкФ	1
30.		10 нФ	1
31.	Конденсатор переключаемый	0 ...70 мкФ	1
32.	Микросхема	K140УД608	1
33.	Транзистор n-p-n	BC639	1
34.	Транзистор полевой MOSFET с каналом n-типа	BS170	1
35.	Тиристор	C106M1	1
36.	Диодный мост	RS407	1
37.	Логическая микросхема	4011В	2
38.	Дроссель	200 мГн	1
39.	Катушка	20 мГн без зазора	1
40.	Трансформатор 12,6В/6,3В	12,6/6,3В	1
41.	Нелинейный элемент	BXZ55c3v6+BXZ55c6v8	1
42.	Тумблер	MT1-1	3
43.	Лампа накаливания	A12 – 1.2 W2*4,6d	1

1.2. Описание моноблока

Общий вид моноблока «Электрические цепи и основы электроники» представлен на рис. 1.

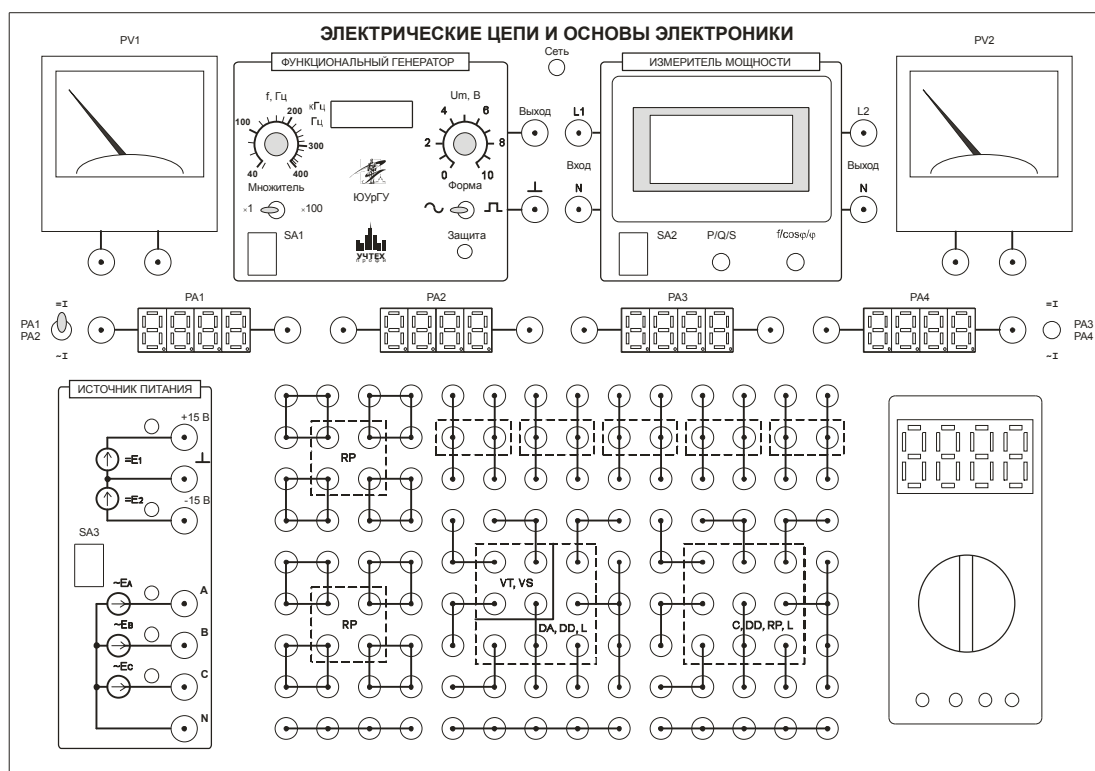


Рис. 1. Общий вид лабораторного моноблока

Для подачи напряжения питания на моноблок, в верхней торцевой части корпуса расположен разъем СНП для ввода в лабораторный стенд однофазного напряжения 220 В, тумблер включения питания и предохранитель на 1 А. В некоторых исполнениях устанавливается дополнительный (дублирующий) разъем СНП на задней части кожуха.

Моноблок включает в себя следующие функциональные блоки: источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, наборное поле.

Для измерения токов в электрических и электронных цепях на лицевой панели установлены измерительные приборы:

- PV1 - стрелочный вольтметр постоянного тока М42300 с пределом измерений 15 В,
- PV2 - стрелочный вольтметр переменного тока типа Ц42300 с пределом измерений 2...15 В,
- PA1...PA4 - четыре цифровых амперметра постоянного/переменного тока с автоматическим выбором предела измерений 400 мА/2,00 А.

Режим измерения постоянного/переменного тока переключается для амперметров PA1, PA2 – тумблером слева, для амперметров PA3, PA4 – тумблером справа.

При измерении постоянного тока положительному направлению тока соответствует протекание от желтой клеммы к черной, при измерении постоянного напряжения – от красной клеммы к черной.

Амперметры включаются при включении источника питания (SA3).

Источник питания

Источник питания предназначен для подачи с помощью соединительных проводов низковольтных постоянных напряжений ± 15 В, и трехфазного переменного напряжения ~ 9 В на наборное поле.

Внешний вид лицевой панели блока представлен на рис. 2. На лицевой панели установлены выключатель SA3 и гнезда для подачи постоянного и переменного напряжений на наборное поле.

Источник питания содержит встроенную защиту от перегрузок и коротких замыканий (на самовосстанавливающихся предохранителях) и световую индикацию нормального режима работы зеленого цвета.

Характеристики источников постоянного и переменного напряжения приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

$=U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$	$=I_{\text{ВЫХ}}, \text{ А}$
+15	0 – 0,3
-15	0 – 0,3

Таблица 2

$\sim U, \text{ В}$	$\sim I_{\text{ВЫХ}}, \text{ не менее, мА}$
A $\sim 9 \pm 10\%$	250
B $\sim 9 \pm 10\%$	250
C $\sim 9 \pm 10\%$	250

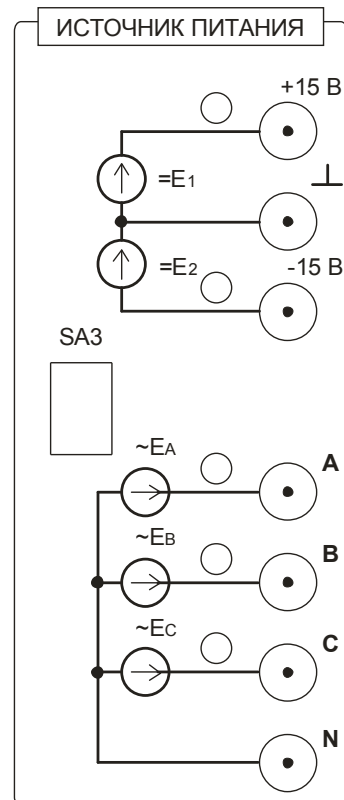


Рис. 2. Источник питания

Функциональный генератор

Функциональный генератор (рис. 3) предназначен для получения измерительных сигналов синусоидальной или прямоугольной форм с плавно регулируемой амплитудой и частотой.

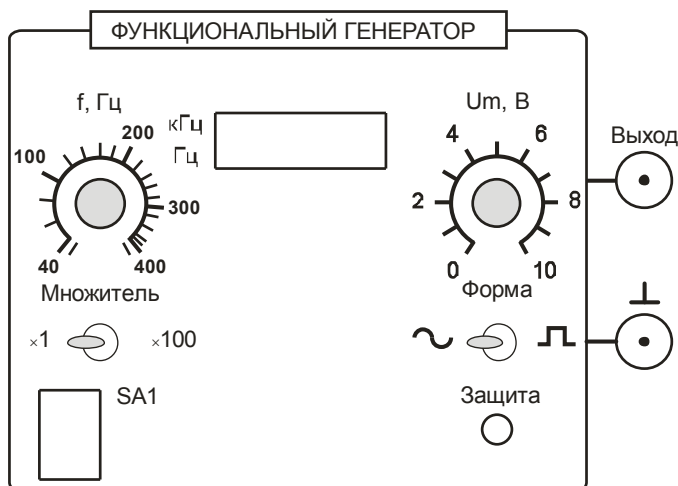


Рис. 3. Функциональный генератор

Форма выходного сигнала устанавливается с помощью тумблера «Форма». Установка поддиапазона генерируемой частоты выполняется с помощью переключателя «Множитель», плавная установка частоты в поддиапазоне – с помощью регулятора «f, Гц».

Индикация в модуле выполнена:

- текущей частоты на 4-сегментном индикаторе;
- поддиапазона «Гц» и «кГц» с помощью светодиодов в левой части индикатора.

Плавная регулировка величины выходного напряжения производится регулятором «Um, В».

Технические характеристики генератора приведены в табл. 3.

Таблица 3

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания	$\sim 220 \text{ В} \pm 10\%$
Максимальный ток нагрузки	0,3 А
Амплитуда выходного напряжения	0,1...11 В
Частотный диапазон	40...400, 4000...40 000 Гц
Погрешность измерения частоты	$\pm 5\%$
Выходное сопротивление	2 Ом

Мультиметр

Мультиметр предназначен для выполнения измерений электрических величин. Некоторые технические параметры мультиметра приведены в табл. 4.

Таблица 4

Измеряемая величина	MS 8221 A	
	Диапазон измерений	Погрешность измерения
Напряжение постоянного тока	200,0 мВ...	
	200,0В;	$\pm 0.5\% \pm 2 \text{ D}$
	1000 В	$\pm 0.8\% \pm 2 \text{ D}$
Напряжение переменного тока	2,000 В...	
	200,0В;	$\pm 0.8\% \pm 3 \text{ D}$
	750 В	$\pm 1.2\% \pm 3 \text{ D}$
Постоянный ток	200,0 мкА...	$\pm 0.8\% \pm 1 \text{ D};$
	20,00 мА; 200,0 мА	$\pm 1.2\% \pm 1 \text{ D};$
	10,00 А	$\pm 2.0\% \pm 5 \text{ D}$
Переменный ток	200,0 мкА...	$\pm 1.2\% \pm 3 \text{ D};$
	20,00 мА; 200,0 мА	$\pm 2.0\% \pm 3 \text{ D};$
	10,00 А	$\pm 3.0\% \pm 7 \text{ D}$
Сопротивление	20,00 МОм	$\pm 1.0\% \pm 2 \text{ D}$

В мультиметре для защиты входа VΩmA использован самовосстанавливающийся предохранитель на 0,3 А, максимальное рабочее напряжение 60 В. Его особенностью являются:

- многократная защита от перегрузок,
- в состоянии срабатывания цепь не полностью обесточивается, а продолжает протекать ток, зависящий от приложенного напряжения. Это может привести к ложным считываниям показаний.

Измеритель мощности

Предназначен для измерения параметров электрической цепи:

- действующего значения напряжения (True RMS) в диапазоне $0 \dots 30$ В;
- действующего значения тока (True RMS) в диапазоне $0 \dots 0,3$ А;
- активной мощности в диапазоне $0 \dots 9$ Вт;
- реактивной мощности в диапазоне $0 \dots 9$ ВАр;
- полной мощности в диапазоне $0 \dots 9$ ВА;
- частоты в диапазоне $5 \dots 400$ Гц;
- $\cos\varphi$;
- угла сдвига фаз между током и напряжением φ .

На рис. 4. представлена лицевая панель прибора условно схема подключения в лабораторном стенде (показано пунктирными линиями). Прибор содержит:

- клеммы подачи входного измеряемого сигнала (генератора) L1 и N и клеммы подключения потребителя (нагрузки) L2 и N. Шунт для измерения тока нагрузки подключен между клеммами L1 и L2;
- индикатор жидкокристаллический четырехстрочный для вывода информации;
- выключатель «SA2» для подключения питания прибора;

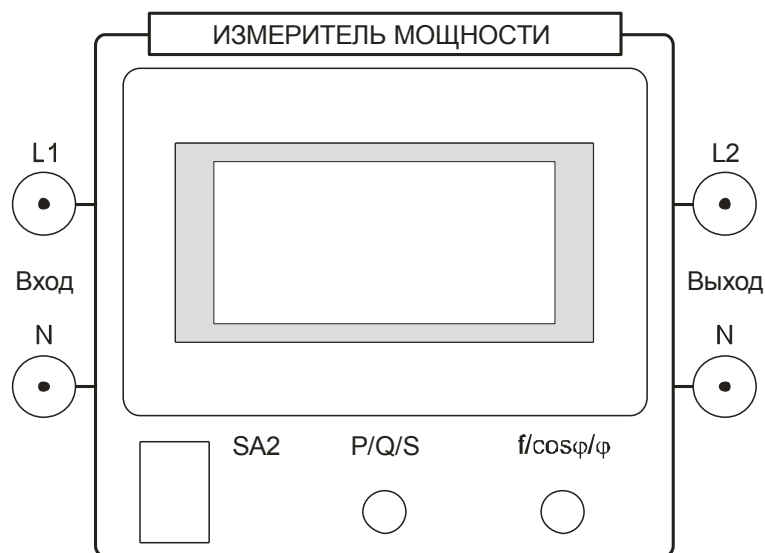


Рис. 4. Измеритель мощности

- кнопка «P/Q/S» изменения вывода информации в третьей строке индикатора, соответственно, активной, реактивной и полной мощности;
- кнопка «f/cosφ/φ» изменения вывода информации в четвертой строке индикатора, соответственно, частоты, косинуса и угла сдвига фаз между током и напряжением.

Последовательность подключения прибора и выполнения измерений:

- подключить внешние цепи измерения;
- включить тумблер «Сеть»;
- для изменения вывода требуемого параметра в третьей или четвертой строках индикатора необходимо нажать на 1..2 секунды кнопку «P/Q/S» или «f/cosφ/φ», соответственно.

Примечание:

1. При одновременном нажатии и удержании в течение 1..2 секунд

кнопок «P/Q/S» и «f/cosφ/φ» измеритель переходит в режим измерения параметров постоянного тока. Повторное нажатие этих кнопок возвращает в режим измерения переменного тока.

2. Изменение схемы соединения подключения прибора и лабораторной установки выполнять при выключенном питании прибора. В противном случае возможны изменения показаний прибора, а также возникновение нарушений в работе индикатора прибора.

Наборное поле

Наборное поле служит для установки минимодулей при сборке исследуемых электрических и электронных цепей. Клеммы соединены согласно мнемосхеме (рис. 5).

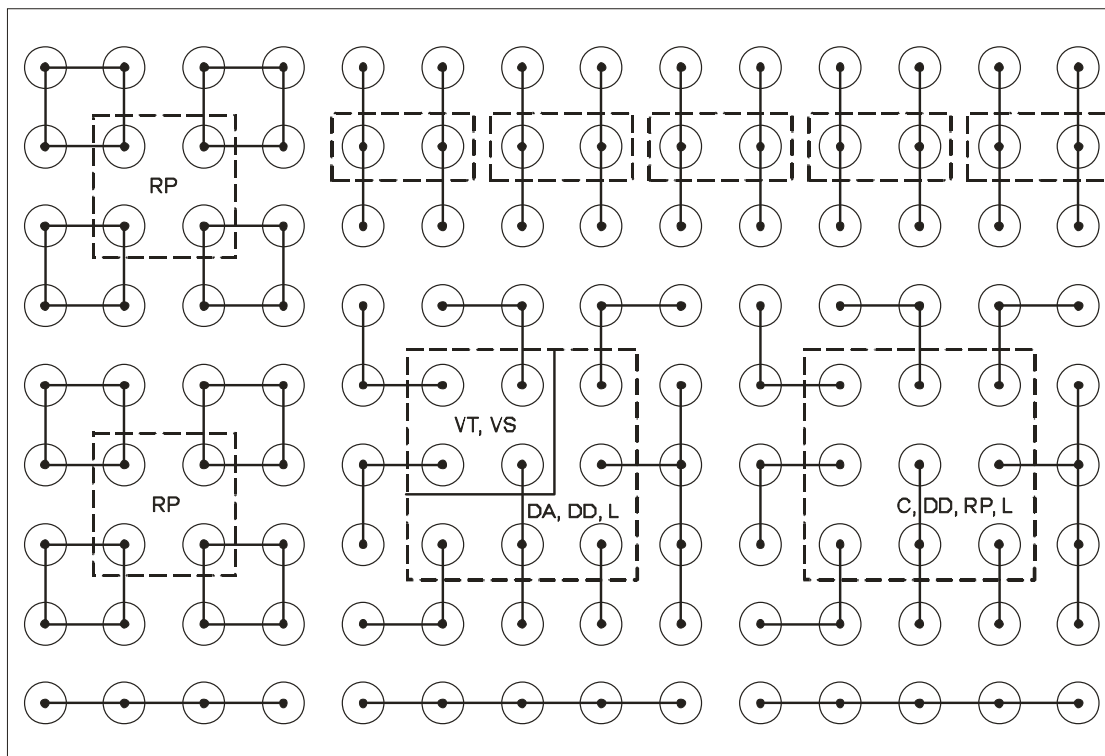


Рис. 5. Наборное поле

1.3. Цель лабораторных занятий

Важнейшей частью курса «Электрические цепи и основы электроники» является лабораторный практикум. Чтобы знать электротехнику и основы электроники, необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи. Решение этих задач может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методом. Экспериментальные методы решения изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия дают возможность:

- закрепить на практике теоретические сведения о работе различных электротехнических и электронных устройств;
- подробно ознакомиться с устройством и характеристиками наиболее важных электротехнических и электронных приборов, аппаратов и машин, составляющих предмет лабораторной практики;
- помочь овладеть практическими способами управления и настройки электротехнических устройств на заданный режим;
- получить практические навыки в проведении измерений электрических величин, пользовании различными измерительными приборами и аппаратами, чтении электрических схем, построении графиков и характеристик,
- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических и электронных устройств;
- выработать умение рассуждать о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных электротехнических устройств для решения тех или иных задач.

В соответствии с государственными образовательными стандартами по курсам электротехники и основы электроники лабораторные работы должны выполняться по разделам электрические цепи постоянного и переменного тока, трехфазные электрические цепи, трансформаторы и электрические машины постоянного и переменного тока, основы электроники.

1.4. Подготовка к лабораторному занятию

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное в соответствии с расписанием занятий время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой из них.

Студент, в первую очередь, должен твердо уяснить цель задания и четко представлять назначение устройства, его условное обозначение на электрических схемах, принцип действия и основные характеристики.

Затем, по материалам руководства необходимо ознакомиться с основными параметрами объекта исследования, источников питания и других используемых в стенде преобразователей и пускорегулирующих аппаратов. Эти сведения нужны для определения диапазона возможного изменения величин и необходимого режима работы объекта исследования. Требуемые расчетные соотношения и формулы следует найти и записать самостоятельно на основе изучения учебных пособий.

Особое внимание следует уделить измерительным приборам. В соответствии с каждым этапом рабочего задания необходимо проанализировать схему соединений, состоящую из элементов объекта исследования и

электроизмерительных приборов. При этом рекомендуется заготовить таблицы для записи показаний приборов.

Одним из важных этапов подготовки к выполнению лабораторной работы является изучение технологии проведения эксперимента, используя методические рекомендации к выполнению рабочего задания.

Завершает этап подготовки к выполнению лабораторной работы составление ответов на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях.

1.5. Проведение эксперимента

Получив разрешение преподавателя на проведение лабораторного исследования, следует немедленно приступить к сборке электрических цепей на рабочем месте. Рекомендуется придерживаться следующего порядка, значительно облегчающего работу по сборке и избавляющего от многих ошибок при соединениях. Общим правилом является соединение сначала участков цепи с последовательным соединением элементов и приборов, а затем параллельных ветвей как объекта исследования, так и приборов.

Этот прием позволяет сознательно подойти к оценке назначения каждого элемента цепи тем самым правильно осуществить её сборку.

Одновременно со сборкой цепи надо произвести маркировку измерительных приборов в соответствии с их условными обозначениями на рабочей схеме соединений. Маркировку приборов можно выполнить с помощью бумажных бирок, которые заготавливает учащийся, выполняющий лабораторное исследование.

Во избежание возможного возникновения больших токов в собранной цепи элементы регулирования потенциометров необходимо устанавливать в положение, соответствующее минимуму напряжения на выходе.

Собранную цепь следует обязательно показать для проверки преподавателю. Только с его разрешения можно включить источник питания и произвести предварительное опробование работы цепи, чтобы убедиться в возможности проведения опыта при заданных пределах измерения величин. Нельзя приступать к измерениям, не будучи совершенно уверенным, что цепь собрана правильно.

Если при испытании цепи постоянного тока стрелка измерительного прибора уходит за пределы шкалы в обратном направлении, надо отключить цепь и переключить подходящие к прибору провода.

При снятии характеристик недопустимо превышать номинальные значения токов и напряжений испытываемого электротехнического устройства, если нет особых указаний в руководстве по лабораторному эксперименту. В случае, если стрелка какого-либо прибора выходит за пределы шкалы, надо немедленно отключить цепь от источника питания, доложить преподавателю или лаборанту и изменить условия эксперимента (уменьшить напряжение питания, увеличить диапазон изменения сопротивления и т.д.).

После предварительного опробования цепи, проверки или оценки диапазона изменения переменного параметра необходимо наметить последовательность отдельных манипуляций и отсчетов, а затем приступить к наблюдениям.

Отсчеты рекомендуется проводить по возможности одновременно по всем приборам. Следует избегать перерыва начатой серии наблюдений и во всех случаях, когда возникает сомнение в правильности полученных наблюдений, их необходимо

повторить несколько раз.

Результаты всех первичных наблюдений и отсчетов записывают в таблицу протокола испытаний. Запись отсчетов должна вестись в точном соответствии с показаниями измерительных приборов. Протоколы наблюдений являются единственным документальным следом, остающимся от измерений, поэтому от точной и своевременной фиксации в таблицах результатов отсчета в значительной степени зависит успех экспериментальной работы.

При переходе от одного этапа исследования к другому необходимо каждый раз обращаться к преподавателю за проверкой правильности полученных результатов, которые представляют в виде таблиц или графиков.

К следующему этапу работы разрешается приступать только после проверки и визирования протокола преподавателем.

1.6. Обработка результатов и оформление отчета

Каждый студент самостоятельно должен обрабатывать данные опытов и подготовить отчет по каждой проделанной работе.

В отчете на титульном листе указываются название учебного заведения, кафедры. Номер и наименование работы, фамилия и инициалы студента, выполнившего работу, номер его академической группы.

Отчет должен содержать, паспортные данные объекта исследования, схемы соединения элементов объекта исследования с включенными измерительными приборами, таблицы с записью результатов эксперимента, обработанные осциллограммы, графики зависимостей и векторные диаграммы.

После проведения эксперимента должны быть сделаны основные выводы, полученные в результате исследования.

Каждая схема должна быть сопровождена соответствующей таблицей записей результатов измерений и графиком, иллюстрирующим изучаемые зависимости. В таблице обязательно следует указывать, в каких единицах измерены исследуемые величины. Все таблицы необходимо снабдить заголовками, характеризующими проводимый опыт.

На основании результатов измерений проводится их окончательная обработка. Измеренные и вычисленные величины заносятся в соответствующие колонки одной и той же таблицы.

Вычерчивание схем и таблиц рекомендуется производить карандашом обязательно с помощью линейки.

Особое внимание надо уделить графикам зависимостей между величинами, т.к. они являются наглядным результатом работы, графическим ответом на вопросы, поставленные в лабораторной работе.

При построении графиков по осям приводят стандартные буквенные обозначения величин и единиц их измерения, указывают деления с одинаковыми интервалами, соответствующие откладываемым величинам в принятых единицах измерения или в десятичных кратных либо дольных единицах.

Числовые отметки у масштабных делений принято выбирать так, чтобы они составляли $10^{\pm n}$, $2 \cdot 10^{\pm n}$ или $5 \cdot 10^{\pm n}$ от тех единиц, в которых выражены величины, откладываемые по осям. Например, 10 мА; 0,02 Ом; 500 Вт.

При построении графиков вдоль оси абсцисс в выбранном масштабе

откладывают независимую переменную. Условное буквенное обозначение этой величины рекомендуется ставить под осью, а наименование единиц измерения либо их десятичных кратных или дольных единиц – после обозначения величины. Вдоль оси ординат масштабные цифры ставят слева от оси, наименование или условное обозначение откладываемых величин – также слева от оси и под этим обозначением указывают единицу измерения. Если в одних координатных осях строят несколько графиков функций одной независимой переменной, то следует провести дополнительные шкалы параллельно основным, каждую со своим масштабом. Если величины по осям абсцисс и ординат отложены в определенном масштабе с числовыми отметками, то не следует ставить стрелок, указывающих направление роста численных значений величин. Наименование единиц измерения дается без скобок. При вычерчивании графиков надо учитывать, что всякое измерение имеет случайные погрешности (истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, а вместо него принимают некоторое её значение, признаваемое за наиболее приближающееся к истинному). Поэтому не следует проводить кривые через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, которые проходят среди экспериментальных точек. Отступление некоторых точек от плавной кривой называют «разбросом точек». Величина разброса при наблюдении закономерных явлений определяет тщательность проведения эксперимента.

При наличии нескольких кривых на одном графике точки, соответствующие опытным данным и относящиеся к различным кривым, должны быть помечены условными значками (крестиками, кружками и т. п.).

Каждый график обязательно должен быть снабжен таким лаконичным текстом, чтобы любой достаточно подготовленный читатель мог легко понять, какую зависимость характеризует построенный график.

На последней странице отчета следует указать дату оформления и поставить подпись.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений. Составление подобных отчетов – первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ»

2.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Контроль работы электрооборудования осуществляется с помощью разнообразных электроизмерительных приборов. Наиболее распространенными электроизмерительными приборами являются приборы непосредственного отсчета. По виду отсчетного устройства различают аналоговые (стрелочные) и цифровые измерительные приборы.

На лицевой стороне стрелочных приборов изображены условные обозначения, определяющие классификационную группу прибора. Они позволяют правильно выбрать приборы и дают некоторые указания по их эксплуатации.

В цепях постоянного тока для измерений токов и напряжений применяются в основном приборы магнитоэлектрической системы. Принцип действия таких приборов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по катушке. Угол поворота стрелки α прямо пропорционален измеряемому току I : $\alpha = K I$. Шкалы магнитоэлектрических приборов равномерные.

В измерительных механизмах электромагнитной системы, применяемых для измерений в цепях переменного и постоянного тока, вращающий момент обусловлен действием магнитного поля измеряемого тока в неподвижной катушке прибора на подвижный ферромагнитный якорь. Угол поворота стрелки α здесь пропорционален квадрату тока: $\alpha = K I^2$. Поэтому шкала электромагнитных приборов обычно неравномерная, что является недостатком этих приборов. Начальная часть шкалы не используется для измерений.

Для практического использования измерительного прибора необходимо знать его предел измерений (номинальное значение) и цену деления (постоянную) прибора. Предел измерений – это наибольшее значение электрической величины, которое может быть измерено данным прибором. Это значение обычно указано на лицевой стороне прибора. Один и тот же прибор может иметь несколько пределов измерений. Ценой деления прибора называется значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы прибора. Цена деления прибора C легко определяется как отношение предела измерений $U_{НОМ}$ к числу делений шкалы N : $C = U_{НОМ} / N$.

На лицевой стороне стрелочных прибора указывается класс точности, который определяет приведенную относительную погрешность прибора $\gamma_{ПР}$. Приведенная относительная погрешность прибора – это выраженное в процентах отношение максимальной для данного прибора абсолютной погрешности ΔU к номинальному значению прибора (пределу измерений) $U_{НОМ}$: $\gamma_{ПР} = 100 \Delta U / U_{НОМ} \%$.

Зная класс точности прибора, можно определить абсолютную ΔU и относительную погрешности измерения $\gamma_{ИЗМ}$, а также действительное значение измеряемой величины $U_{Д}$:

$$\Delta U = \gamma_{ПР} U_{НОМ} / 100; \quad \gamma_{ИЗМ} = 100 \Delta U / U; \quad U_{Д} = U \pm \Delta U.$$

Нетрудно сделать вывод, что относительная погрешность измерения тем

больше, чем меньше измеряемая величина по сравнению с номинальным значением прибора. Поэтому желательно не пользоваться при измерении начальной частью шкалы стрелочного прибора.

Для обеспечения малой методической погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление амперметра было значительно меньше сопротивления нагрузки, а сопротивление вольтметра было значительно больше сопротивления исследуемого участка.

При проведении измерений в электрических цепях широкое применение получили цифровые мультиметры – комбинированные цифровые измерительные приборы, позволяющие измерять постоянное и переменное напряжение, постоянный и переменный ток, сопротивления, проверять диоды и транзисторы. Для проведения конкретного измерения необходимо установить переключателем предполагаемый предел измерений измеряемой величины (ток, напряжение, сопротивление) с учетом рода тока (постоянный или переменный). Представление результата измерения происходит на цифровом отсчетном устройстве в виде обычных удобных для считывания десятичных чисел. Наибольшее распространение в цифровых отсчетных устройствах мультиметров получили жидкокристаллические, газоразрядные и светодиодные индикаторы. На передней панели такого прибора находится переключатель функций и диапазонов. Этот переключатель используется как для выбора функций и желаемого предела измерений, так и для выключения прибора. Для продления срока службы источника электропитания прибора переключатель должен находиться в положении «OFF» в тех случаях, когда прибор не используется.

К основным техническим характеристикам цифровых приборов, которые необходимо учитывать при выборе относятся:

- диапазон измерений (обычно прибор имеет несколько поддиапазонов);
- разрешающая способность, под которой часто понимают значение измеряемой величины, приходящееся на единицу дискретности, то есть один квант;
- входное сопротивление, характеризующее собственное потребление прибором энергии от источника измерительной информации;
- погрешность измерения, часто определяемая как $\pm(\% \text{ от считываемых данных} + \text{количество единиц младшего разряда})$ или $\pm(\% \text{ of rdg} + D)$.

Мультиметр часто имеет батарейное питание 9В, поэтому перед использованием прибора необходимо проверить батарею электропитания путем включения прибора. Если батарея разряжена, то на дисплее возникнет условное изображение батареи. Используемые в стенде «Электротехника» мультиметры питаются от выпрямительного устройства, вмонтированного в модуль. Перед проведением измерения необходимо переключатель пределов установить на требуемый диапазон измерений. Для предотвращения повреждения схемы прибора входные токи и напряжения не должны превышать указанных величин. ***Если предел измеряемого тока или напряжения заранее неизвестен, следует устанавливать переключатель пределов на максимум и затем переключать его вниз по мере необходимости.***

Используемый в стенде мультиметр: **MS8221A** с ручным выбором поддиапазона измерений (возможно изменение типа прибора без ухудшения его параметров).

Для измерения **напряжения** подключите один щуп к разъему COM, а второй – к разъему «VΩ», установите переключатель функций в положение «V=» или «V~», что означает режим измерения постоянного (DC) или переменного (AC) напряжения соответственно. Подсоедините концы щупов к измеряемому источнику напряжения. При измерении постоянного напряжения полярность напряжения на дисплее будет соответствовать полярности напряжения на втором щупе.

Для измерения **сопротивлений** подключите один щуп к разъему «COM», а второй – к разъему «VΩ», установите переключатель функций на «Ω» и подсоедините концы щупов к измеряемому сопротивлению. Когда цепь разомкнута, на индикаторе будет индигироваться «1 .». **Перед измерением сопротивлений в схеме убедитесь, что схема обесточена и все конденсаторы разряжены.**

Характеристики используемого мультиметра см. таблицу 4.

Электрическая цепь, состоящая из элементов, вольтамперные характеристики которых являются прямыми линиями, называется линейной электрической цепью, а элементы, из которых состоит цепь, – линейными элементами.

Соединение в электрической цепи, при котором через все элементы протекает один и тот же ток, называется последовательным соединением. Эквивалентное сопротивление R_3 последовательной цепи постоянного тока равно сумме сопротивлений отдельных участков: $R_3 = R_1 + R_2 + \dots$. Напряжение на отдельном участке в соответствии с законом Ома пропорционально сопротивлению этого участка: $U_1 = I R_1$; $U_2 = I R_2$.

Напряжение U на входе последовательной цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа равно сумме напряжений на отдельных участках:

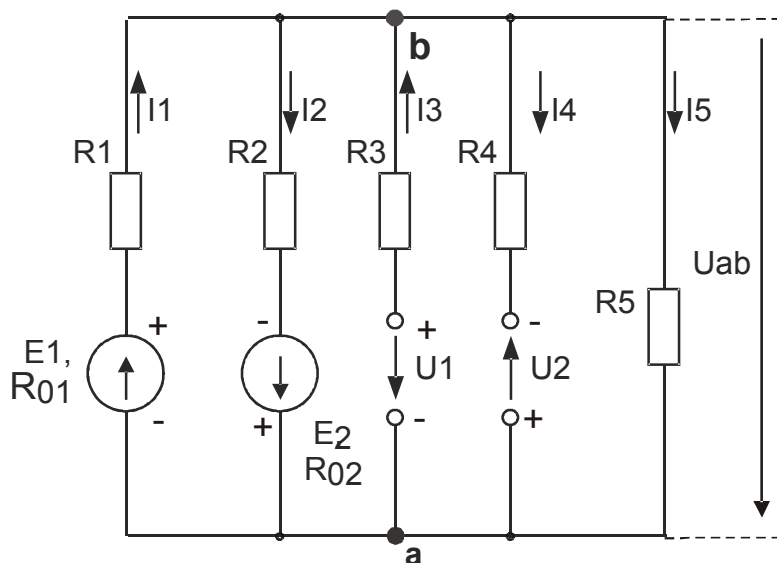
$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

При параллельном соединении двух или нескольких элементов напряжение на них одно и тоже, так как выводы этих элементов подключены к одним и тем же узлам. Токи в отдельных элементах определяются по закону Ома: $I_1 = U / R_1$; $I_2 = U / R_2$.

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток I в неразветвленной части цепи равен сумме токов всех параллельных ветвей: $I = I_1 + I_2 + \dots$

Проводимость параллельного соединения равна сумме проводимостей отдельных участков: $1/R_3 = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$

Анализ любой электрической цепи может быть проведен методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Если электрическая цепь состоит только из параллельных ветвей, то есть имеет два узла (рис. 1), то её анализ целесообразно проводить методом узлового напряжения, применение которого является менее трудоемким и позволяет избежать решения системы уравнений.



Метод узлового напряжения рекомендуется использовать и в тех случаях, когда сложную электрическую схему можно упростить, заменяя последовательно и параллельно соединенные резисторы эквивалентными, используя при необходимости преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду.

Применение данного метода состоит из двух этапов. На первом этапе определяется величина узлового напряжения U_{ab} (рис. 2.1):

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + U_1 g_3 - U_2 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5},$$

где $g_1 \dots g_5$ – проводимости соответствующих ветвей цепи.

При записи этого соотношения следует задаться положительным направлением узлового напряжения U_{ab} . Со знаком «+» берутся ЭДС, направленные между точками **а** и **б** *встречно* напряжению U_{ab} , и напряжения ветвей, направленные *согласно* с U_{ab} .

При анализе электрических цепей методом узлового напряжения рекомендуется выбирать положительные направления токов после определения узлового напряжения. После определения величины напряжения U_{ab} находят значения токов в ветвях, составляя уравнения по второму закону Кирхгофа. При этом каждый контур должен включать в свой состав ветвь с искомым током и узловое напряжение. Например, уравнение по второму закону Кирхгофа для определения тока в первой ветви будет иметь вид:

$$E_1 = I_1(R_{01} + R_1) + U_{ab}.$$

Откуда

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_{01} + R_1} = (E_1 - U_{ab})g_1.$$

Под нелинейной электрической цепью понимают электрическую цепь, содержащую нелинейные элементы (нелинейные сопротивления, нелинейные индуктивности, нелинейные емкости). Нелинейным элементом называют такой элемент электрической цепи, параметры которого зависят от электрического напряжения, электрического заряда, электрического тока или магнитного потока. Схема замещения цепи постоянного тока содержит только нелинейные резистивные элементы. Нелинейные элементы в отличие от линейных обладают нелинейными вольтамперными характеристиками.

Основной характеристикой нелинейного элемента является его вольтамперная характеристика $U=f(I)$ (рис. 2), из которой видно, что каждому значению постоянного тока (напряжения) соответствует определенное значение постоянного напряжения (тока).

У нелинейных элементов различают статическое и динамическое сопротивления. По вольтамперной характеристике определяют статическое сопротивление нелинейного элемента в данной точке A $R_{CT} = U/I$ и его дифференциальное (динамическое) сопротивление как отношение бесконечно малых приращений напряжения dU и тока dI $R_d = dU/dI$. Динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона β касательной к вольтамперной характеристике в данной точке. Для экспериментального получения вольтамперной характеристики нелинейного элемента необходимо измерить ряд

значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи с данным нелинейным элементом.

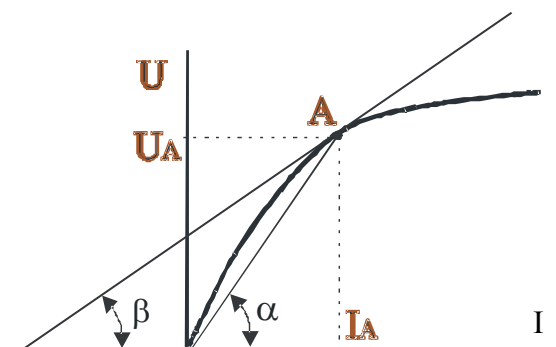


Рис. 2

Математическая модель нелинейной цепи постоянного тока состоит из уравнений Кирхгофа и уравнений характеристик нелинейных резистивных элементов. Так как модель становится нелинейной, то не может быть решена методами линейной алгебры. К нелинейным цепям применимы законы Кирхгофа, хотя методы анализа, основанные на методе наложения (на постоянстве параметров элементов цепи) чаще всего неприменимы. В таких цепях сопротивление и проводимость нелинейного элемента являются нелинейной функцией мгновенного значения тока (напряжения) на этом элементе. Следовательно, они представляют собой переменные величины, а поэтому для расчета мало пригодны.

Так как характеристики нелинейных элементов $U=f(I)$ или $I=f(U)$ часто определяются экспериментально и задаются обычно в виде таблиц или графиков, то широкое применение получили графические (графоаналитические) методы расчета. При этом последовательность операций сохраняется примерно той же, что и при расчетах линейных цепей, только вместо сложения и вычитания напряжений и токов в соответствии с законами Кирхгофа производится сложение или вычитание абсцисс или ординат соответствующих вольтамперных характеристик. Расчет сводится к построению эквивалентной вольтамперной характеристики цепи. В соответствии с законами Кирхгофа при последовательном соединении элементов характеристики складывают при одинаковых значениях тока, при параллельном соединении — при одинаковых значениях напряжения.

Работа № 1-1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

1. Цель работы

Изучение электроизмерительных приборов, используемых в лабораторных работах, выполняемых на стенде. Получение представлений о пределе измерения и цене деления, абсолютной и относительной погрешности, условиях эксплуатации и других характеристиках стрелочных электроизмерительных приборов, получение навыков работы с цифровыми измерительными приборами.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Изучение паспортных характеристик стрелочных электроизмерительных приборов. Для этого внимательно рассмотреть лицевые панели стрелочных вольтметров и заполнить табл. 1.

Таблица 1

Характеристика электроизмерительного прибора			
Наименование прибора			
Система измерительного механизма			
Предел измерения			
Число делений шкалы			
Цена деления			
Минимальное значение измеряемой величины			
Класс точности			
Допустимая максимальная абсолютная погрешность			
Род тока			
Нормальное положение шкалы			
Прочие характеристики			

2.2. Построить график зависимости относительной погрешности измерения от измеряемой величины $\gamma_{\text{изм}} = f(U_{\text{изм}})$ для прибора, указанного преподавателем. Сделать вывод о величине относительной погрешности измерения в начальной и конечной части шкалы, о характере изменения погрешности вдоль шкалы прибора. Красная клемма вольтметра соответствует «+», черная – «-».

2.3. Ознакомиться с лицевой панелью мультиметра и зарисовать её.

2.4. Подготовить мультиметр для измерения постоянного напряжения. Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF модуля питания) и источник постоянного напряжения. Измерить значения выходных напряжений модуля питания на клеммах «+15 В» и «-15 В» относительно общей клеммы. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить источник постоянного напряжения.

Таблица 2

Клеммы	+15 В	-15 В	A	B	C	A-B	B-C	C-A
Измерено								

2.5. Подготовить мультиметр для измерения переменного напряжения. Включить источник постоянного напряжения, затем трехфазный источник питания и мультиметром измерить значения выходных напряжений на клеммах «А», «В», «С», «А-В», «В-С», «С-А». Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить источник трехфазного напряжения и источник постоянного напряжения.

2.6. Подготовить мультиметр для измерения сопротивлений резисторов. Измерить значения сопротивлений резисторов, указанных преподавателем. Результаты занести в табл. 3.

Таблица 3

Резистор	R1	R2	R3	R4
Номинальное значение сопротивления, Ом				
Измерено, Ом				

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные измерительных приборов;
- в) график зависимости относительной погрешности измерений

$$\gamma_{\text{изм}} = f(U_{\text{изм}});$$

- г) результаты измерений;
- д) выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем?
2. Что такое предел измерения?
3. Как определяется цена деления прибора?
4. Что такое абсолютная и относительная погрешности измерения?
5. Что характеризует класс точности прибора?
6. В какой части шкалы прибора измерение точнее и почему?
7. Каковы основные достоинства цифровых измерительных приборов?

Работа № 1-2. ПРОСТЕЙШИЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Получение навыков сборки простых электрических цепей, включения в электрическую цепь измерительных приборов. Научиться измерять токи и напряжения, убедиться в соблюдении законов Ома и Кирхгофа в линейной электрической цепи.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Резистор 2 Вт 150 Ом	1
Резистор 2 Вт 330 Ом	1

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры PA1...PA4, наборное поле и минимодули резисторов). Собрать линейную электрическую цепь с последовательным соединением резисторов (рис. 1). В качестве амперметров использовать цифровые приборы, тумблер «=I/~I» установить в положение «=I». В качестве вольтметра использовать стрелочный вольтметр PV1 (красная клемма вольтметра соответствует «+», черная – «-»). Представить схему для проверки преподавателю.

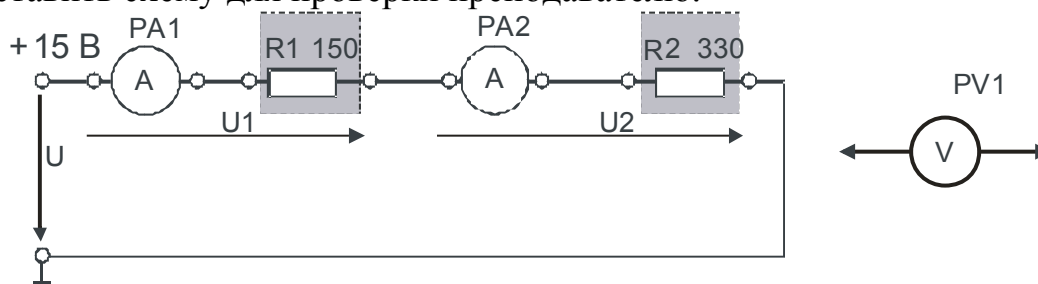


Рис.1

2.2. Включить электропитание стенда (тумблер в верхней торцевой части корпуса), и источник постоянного напряжения (выключатель SA3). Измерить ток в цепи, величину напряжения U на входе цепи и напряжения U_1 и U_2 на резисторах R1 и R2. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник постоянного напряжения.

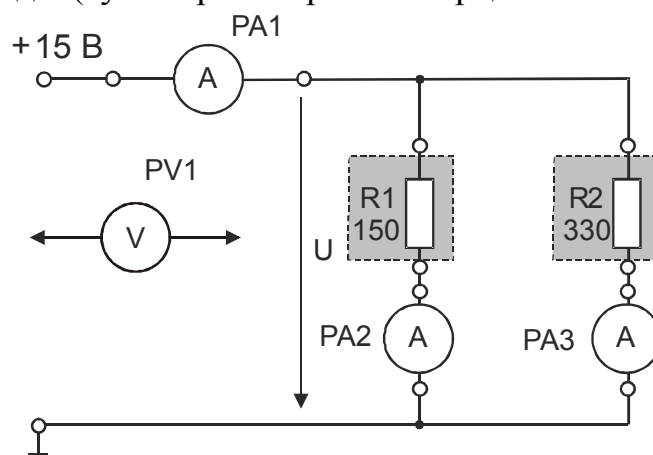


Рис. 2

2.3. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резисторов (рис. 2). В качестве амперметров PA1...PA3 использовать цифровые приборы. В качестве вольтметра использовать стрелочный вольтметр PV1 (красная клемма вольтметра соответствует «+», черная – «-»). Представить схему для проверки преподавателю.

2.4. Включить электропитание стенда и источник постоянного напряжения. Измерить напряжения и токи на всех участках цепи. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Последовательное соединение						Параллельное соединение				
U, В	U ₁ , В	U ₂ , В	U= U ₁ + U ₂ , В	I ₁ , мА	I ₂ , мА	U, В	I ₁ , мА	I ₂ , мА	I ₃ , мА	I ₁ = I ₂ + I ₃ , мА

2.5. Рассчитать относительную погрешность измерения напряжения U, U₁ и U₂ стрелочным вольтметром PV1. Результаты расчета занести в табл. 2.

Таблица 2

	U	U ₁	U ₂
Предел измерения прибора, В			
Класс точности прибора, %			
Измеренное значение напряжения, В			
Относительная погрешность измерения, %			

2.6. Проверить выполнение баланса мощностей.

2.7. Сделать выводы о выполнении законов Кирхгофа и о применении закона Ома в линейной электрической цепи постоянного тока.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование работы и цель работы;
- схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;
- результаты расчетов;
- выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

- Что такое «линейный элемент» в электрической цепи?
- Привести примеры линейных элементов электрических цепей.
- В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, мощность и сопротивление?
- Как по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи постоянного тока и потребляемую им мощность?
- Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.
- Как определить величину эквивалентного сопротивления при последовательном соединении резисторов?
- Как определить величину эквивалентного сопротивления при параллельном соединении резисторов?
- Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.
- В чем заключается баланс мощностей в цепи постоянного тока?

Работа № 1-3. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Получение навыков сборки электрических цепей, измерений токов и напряжений на отдельных участках электрической цепи; убедиться в соблюдении законов Кирхгофа в разветвленной линейной электрической цепи; научиться применять законы Кирхгофа в графическом виде.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Резистор 2 Вт 68 Ом	1
Резистор 2 Вт 150 Ом	1
Резистор 2 Вт 330 Ом	1
Потенциометр ППБ-3А-150 Ом	1

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры PA1...PA4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Собрать линейную цепь со смешанным соединением резисторов (рис. 1). В качестве амперметров использовать цифровые приборы в режиме измерения постоянного тока. В качестве вольтметра использовать стрелочный вольтметр PV1. Представить схему для проверки преподавателю.

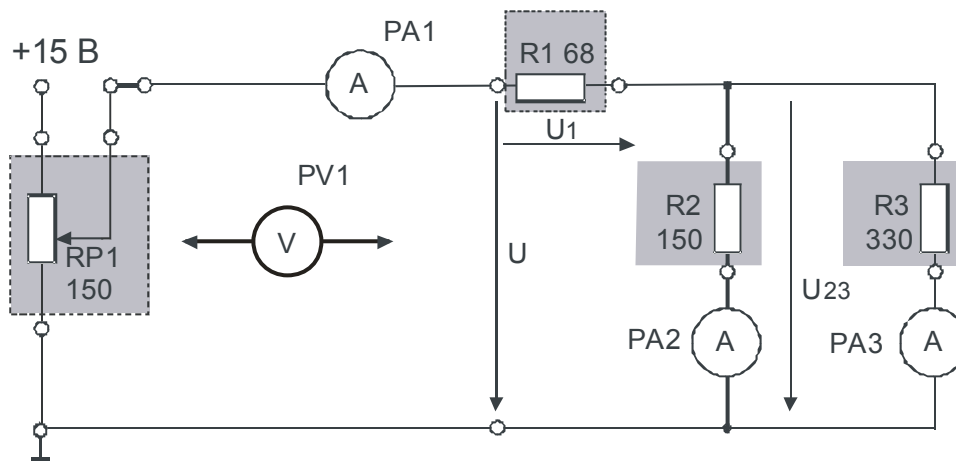


Рис. 1

2.3. Включить электропитание. Плавно изменяя величину входного напряжения с помощью потенциометра RP1, измерить значения напряжения и токов на всех участках цепи при трех значениях входного напряжения (по указанию преподавателя). Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание.

2.4. По результатам измерений вычислить значения сопротивлений всех участков исследуемой цепи и величину эквивалентного сопротивления всей цепи. Результаты расчетов занести в табл. 2.

2.5. По результатам измерений построить в одной координатной системе вольтамперные характеристики резисторов R_1 , R_2 , R_3 . Пользуясь ими, построить вольтамперную характеристику всей цепи $U_{\text{вх}} = f(I_1)$ и по ней определить эквивалентное сопротивление цепи $R_{\text{экв}}$. Здесь же построить экспериментальную вольтамперную характеристику цепи $U_{\text{вх}} = f(I_1)$, сравнить её с расчетной вольтамперной характеристикой всей цепи и сделать вывод о возможности графического применения законов Кирхгофа.

Таблица 1.

№ опыта	U, В	U ₁ , В	U ₂₃ , В	U = U ₁ + U ₂₃ , В	I ₁ , мА	I ₂ , мА	I ₃ , мА	I ₁ = I ₂ + I ₃ , мА
1								
2								
3								

Таблица 2

2.6. Сделать вывод о возможности применения законов Кирхгофа в графическом виде в электрической цепи постоянного тока.

Резистор	Вычислено
R ₁ , Ом	
R ₂ , Ом	
R ₃ , Ом	
R _{экв} , Ом	

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование работы и цель работы;
- схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;
- результаты расчетов;
- выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

- Как по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи постоянного тока и потребляемую им мощность?
- Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.
- Как определить величину эквивалентного сопротивления для исследуемой цепи?
- Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.
- Как по вольтамперной характеристике определить величину сопротивления цепи?

Работа № 1-4. НЕЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

Экспериментальное получение вольтамперных характеристик линейных и нелинейных резистивных элементов, графический расчет неразветвленной нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Потенциометр ППБ-3А-150 Ом	1
Лампа накаливания А12 – 1.2 W2*4,6d	1
Резистор 2 Вт 100 Ом	1

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперных характеристик элементов цепи (рис. 1) и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать минимодуль потенциометра RP1. В качестве амперметра использовать цифровой прибор. В качестве вольтметра использовать стрелочный прибор.

Предъявить схему для проверки преподавателю.

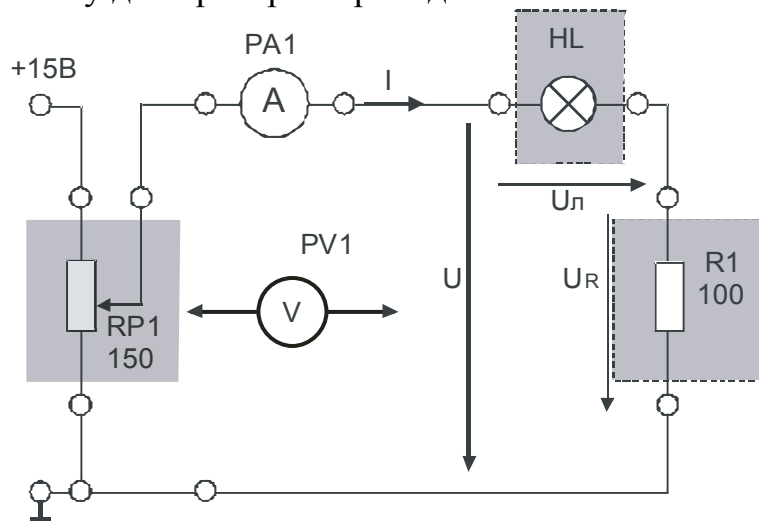


Рис.1

2.3. Снять вольтамперные характеристики лампы накаливания, резистора и всей цепи. Для этого установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Включить источник питания (выключатель SA3). Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1, провести необходимые измерения при изменении тока от 0 до 80...100 мА. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник питания. В одной координатной системе построить вольтамперные характеристики цепи, лампы накаливания HL и резистора R1.

Таблица 1

I, A	0									
U, В	0									
U _л , В	0									
U _Р , В	0									

2.4. Записать уравнение второго закона Кирхгофа для исследуемой цепи. Используя экспериментальные вольтамперные характеристики резистора и лампы накаливания, построить в той же системе координат расчетную вольтамперную характеристику всей цепи $U_{\text{расч}}=f(I)$ и сравнить её с полученной экспериментально вольтамперной характеристикой цепи $U_{\text{эсп}}=f(I)$.

2.5. Выполнить графический расчет тока и напряжений на отдельных участках цепи по рис. 1. для указанного преподавателем значения входного напряжения. Результаты расчета занести в табл. 2.

Таблица 2

	U, В	U _{HL} , В	U _Р , В	I, А
Расчет				
Эксперимент				

2.6. Для проверки расчета нелинейной цепи включить источник питания и установить заданное (расчетное) значение входного напряжения U. Измерить ток I и напряжения U_Р и U_{HL} на отдельных участках цепи. Результаты занести в табл. 2.

2.7. Сделать вывод об особенностях применения законов Кирхгофа в нелинейной цепи постоянного тока.

2.8. По указанию преподавателя рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления лампы накаливания.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- в) расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- г) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- д) выводы.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?
2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.
3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?
4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?
5. Как построить вольтамперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?
6. Как построить вольтамперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?
7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?
8. Как определяется динамическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

Работа № 1-5. РАЗВЕТВЛЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Экспериментальное получение вольтамперных характеристик нелинейных резистивных элементов, графический расчет разветвленной нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Потенциометр ППБ-3А-150 Ом	1
Нелинейный элемент	1
Лампа накаливания А12 – 1.2 W2*4,6d	1
Резистор 2 Вт 100 Ом	1

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперных характеристик элементов цепи (рис. 1) и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать минимодуль потенциометра RP1. В качестве амперметра использовать цифровой амперметр в режиме измерения постоянного тока. В качестве вольтметра использовать стрелочный прибор.

Обратить внимание на полярность напряжения на нелинейном элементе R1.

Предъявить схему для проверки преподавателю.

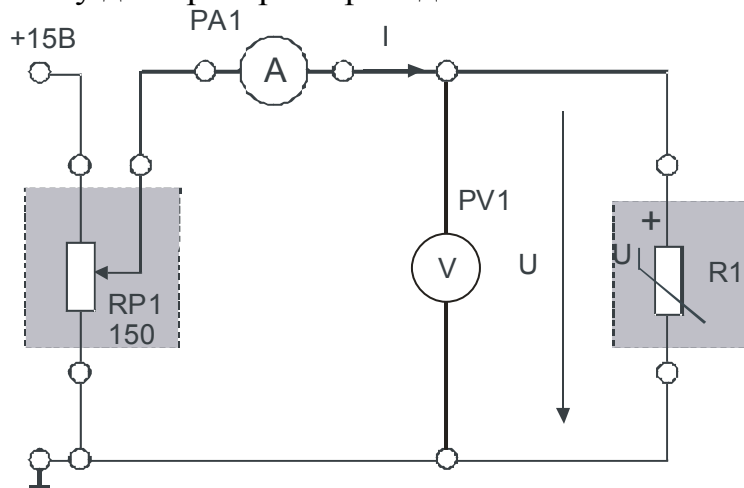


Рис. 1

2.3. Снять вольтамперную характеристику нелинейного элемента R1. Для этого установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Включить источник питания (выключатель SA3). Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 провести необходимые измерения при изменении тока от 0 до

80...100 мА. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание стенда. Построить вольтамперную характеристику нелинейного элемента.

Таблица 1

U, В	0									
I, А	0									

2.4. Снять вольтамперные характеристики лампы накаливания и резистора. Для этого собрать цепь с последовательным соединением лампы накаливания HL и резистора R1 (рис. 2). Предъявить схему для проверки преподавателю.

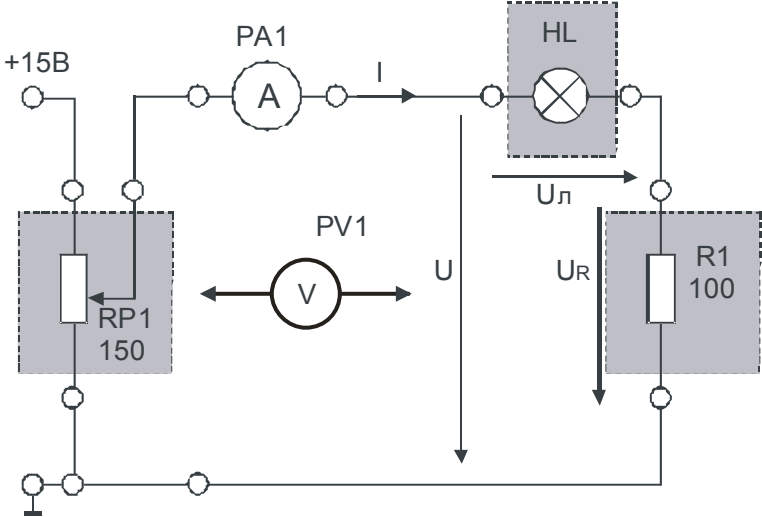


Рис. 2

Установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Включить источник питания (выключатель SA3). Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 измерять напряжения на входе цепи U, на лампе накаливания U_Л и на резисторе U_Р, а также ток I. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить электропитание стенда. Построить вольтамперные характеристики цепи, лампы накаливания HL и резистора R1.

Таблица 2

I, А	0									
U, В	0									
U _Л , В	0									
U _Р , В	0									

2.5. Снять вольтамперную характеристику цепи со смешанным соединением элементов. Для этого собрать электрическую цепь по рис. 3 и предъявить её для проверки преподавателю.

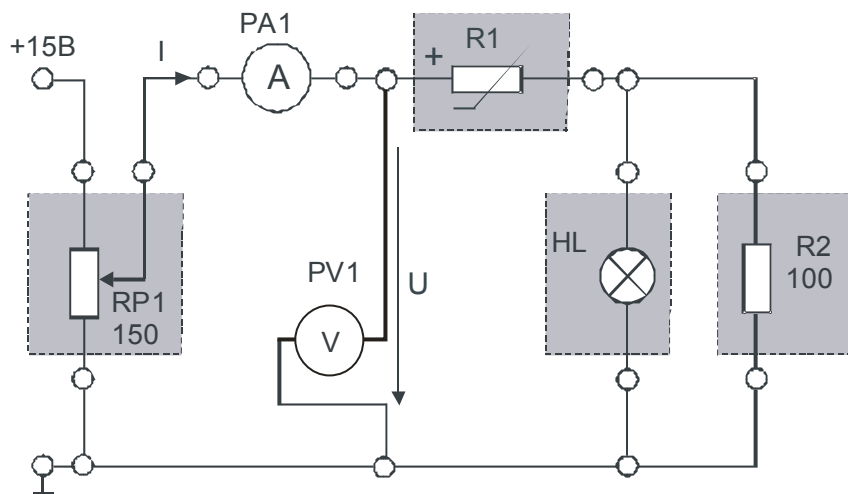


Рис. 3

Включить источник питания и снять вольтамперную характеристику всей цепи $U_{\text{эксп}}=f(I)$. Установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 измерять напряжения на входе цепи U и ток I_1 , потребляемый от источника питания. Результаты измерений занести в табл. 3. Выключить источник питания.

Таблица 3

U, B	0									
I, A	0									

2.6. Записать уравнения законов Кирхгофа для исследуемой цепи. Используя результаты экспериментов, построить расчетную вольтамперную характеристику всей цепи $U_{\text{расч}}=f(I)$. Здесь же нарисовать полученную экспериментальную вольтамперную характеристику цепи $U_{\text{эксп}}=f(I)$ и сравнить их.

2.7. Выполнить графический расчет токов ветвей и напряжений на отдельных участках цепи по рис. 3 для указанного преподавателем значения входного напряжения. Результаты расчета занести в табл. 4.

Таблица 4

	U, B	U_1 , B	U_{23} , B	I_1 , A	I_2 , A	I_3 , A
Расчет						
Эксперимент						

2.8. Для проверки расчета нелинейной цепи собрать электрическую цепь по рис. 4 и предъявить её для проверки преподавателю. После проверки схемы включить электропитание и установить заданное значение входного напряжения U . Измерить токи I_1 , I_2 и I_3 , а также напряжения U_1 и U_{23} на отдельных участках цепи. Результаты занести в табл. 4.

2.9. Сделать вывод об особенностях применения законов Кирхгофа в нелинейной цепи постоянного тока.

2.10. По указанию преподавателя рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного элемента.

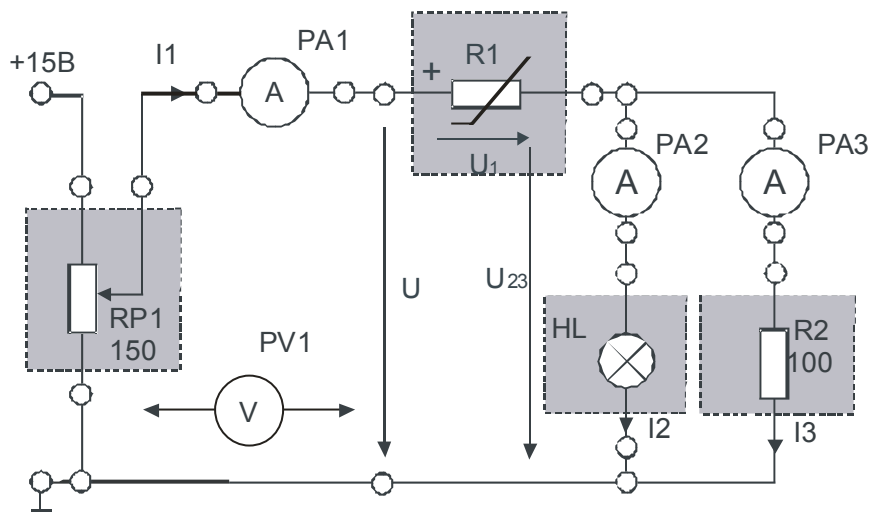


Рис. 4

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- в) расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- г) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- д) выводы.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?
2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.
3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?
4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?
5. Как построить вольтамперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?
6. Как построить вольтамперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?
7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?
8. Как определяется динамическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

Работа № 1-6. СЛОЖНАЯ ЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Экспериментальная проверка результатов аналитического расчета линейной электрической цепи с двумя источниками электропитания.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Тумблер МТ1	2
Резистор 2 Вт 100 Ом	1
Резистор 2 Вт 150 Ом	1
Резистор 2 Вт 330 Ом	1

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 1. В качестве амперметров использовать цифровые амперметры в режиме измерения постоянного тока. Для измерения напряжения использовать стрелочный прибор. В качестве источников питания E1 и E2 использовать источники постоянного напряжения +15 В и -15 В соответственно. Предъявить цепь для проверки преподавателю.

2.2. Включить электропитание стенда и при разомкнутых ключах SA4 и SA5 измерить э.д.с. источников питания E1 и E2. Результаты измерений занести в табл.1.

2.3. Замкнуть ключи SA4 и SA5. Измерить токи I1, I2, I3. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица.1

E1, В	E2, В	I1, мА	I2, мА	I3, мА	φ_b , В	φ_c , В	φ_d , В

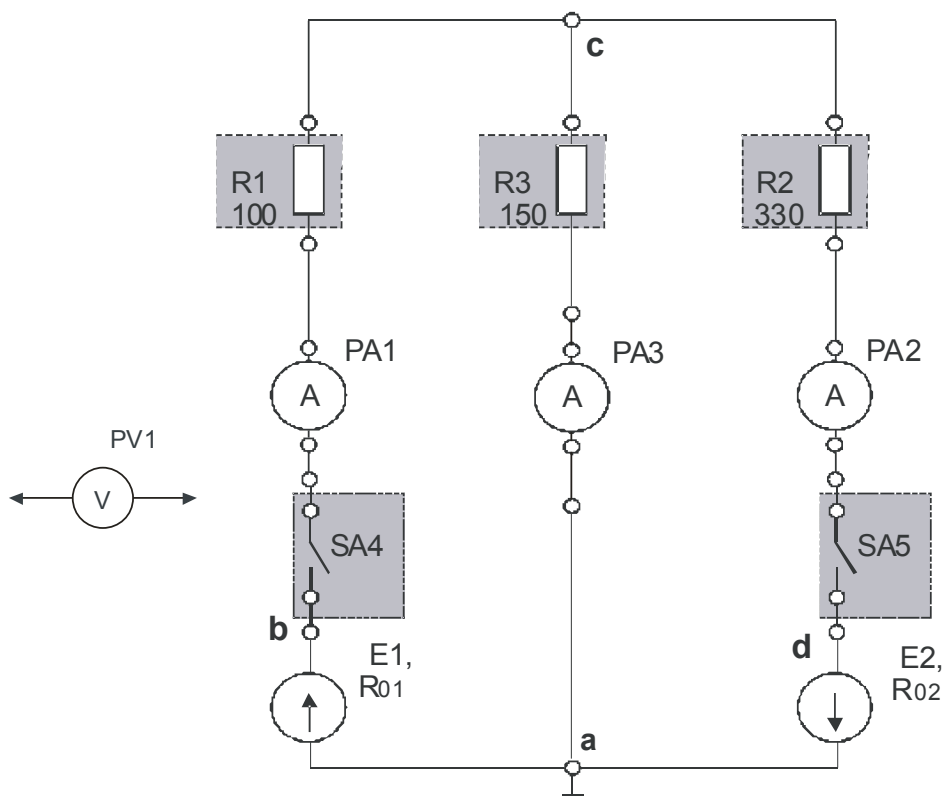


Рис. 1

2.4. Полагая потенциал точки «а» равным нулю ($\varphi_a=0$), измерить мультиметром в режиме измерения постоянного напряжения потенциалы точек «b», «с» и «d» (φ_b , φ_c , φ_d). Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание стенда.

2.5. По результатам измерений вычислить:

- напряжения U_1 и U_2 на зажимах источников электропитания при замкнутых ключах SA4 и SA5;
- внутренние сопротивления R_{01} и R_{02} источников электропитания;
- сопротивления R_1 , R_2 и R_3 ветвей цепи (с учетом внутренних сопротивлений измерительных приборов).

Результаты вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

U_1 , В	U_2 , В	U_{ca} , В	R_{01} , Ом	R_{02} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА

2.6. Используя метод узлового напряжения, рассчитать величину узлового напряжения U_{ca} и токи I_1 , I_2 , I_3 . Результаты вычислений занести в табл. 2.

Сравнить расчетные значения токов с их экспериментальными значениями.

2.7. Для внешнего контура построить потенциальную диаграмму.

2.8. Построить внешние характеристики источников питания $U_1=f(I_1)$ и $U_2=f(I_2)$.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы эксперимента и таблицы с результатами измерений и вычислений;
- в) расчетные соотношения и экспериментальные характеристики;
- г) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- д) выводы

4. Контрольные вопросы

1. Какие методы анализа цепей постоянного тока могут быть использованы для анализа исследуемой цепи?

2. Сколько уравнений по законам Кирхгофа необходимо записать для исследуемой цепи для её расчета? Сколько из них надо записать по второму закону Кирхгофа?

3. Запишите для исследуемой цепи необходимые для анализа исследуемой цепи уравнения по законам Кирхгофа.

4. В каких случаях целесообразно применять метод узлового напряжения?

5. В чем состоит основное достоинство метода узлового напряжения?

6. Запишите соотношение для определения величины узлового напряжения в исследуемой цепи.

7. Как в исследуемой цепи при использовании метода узлового напряжения определить токи в ветвях? Запишите эти соотношения.

8. Что такое «внешняя характеристика» источника питания? Запишите уравнение внешней характеристики.

9. Что такое «потенциальная диаграмма»?

2.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При расчете цепей переменного тока, в отличие от цепей постоянного тока, необходимо учитывать не один, а три простейших пассивных элемента: резистивный, индуктивный и емкостной, которые характеризуются соответственно параметрами: активным сопротивлением R , индуктивностью L (индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$) и емкостью C (емкостным сопротивлением $X_C = 1/\omega C$), где ω – угловая частота.

В реальной цепи сопротивлением обладают не только резистор или реостат как устройства, предназначенные для использования их электрических сопротивлений, но и любой проводник, катушка, конденсатор, обмотка любого электромагнитного элемента и др. Общим свойством всех устройств, обладающих электрическим сопротивлением, является необратимое преобразование электрической энергии в тепловую энергию. При токе i в резисторе, обладающим сопротивлением r за время dt в соответствии с законом Джоуля – Ленца выделяется энергия $dW = ri^2 dt$.

Тепловая энергия, выделяемая в сопротивлении, полезно используется или рассеивается в пространстве. Но поскольку преобразование электрической энергии в тепловую энергию в пассивном элементе носит необратимый характер, то в схеме замещения во всех случаях, когда необходимо учесть необратимое преобразование энергии, включается сопротивление. В реальном устройстве, например, в электромагните, электрическая энергия может быть преобразована в механическую энергию (притяжение якоря), но в схеме замещения это устройство заменяется сопротивлением, в котором выделяется эквивалентное количество тепловой энергии. И при анализе схемы нам уже безразлично, что в действительности является потребителем энергии электромагнит или электроплитка.

В цепях переменного тока сопротивление называют активным, которое из-за явления поверхностного эффекта больше, чем электрическое сопротивление постоянному току. Однако при низких частотах этой разницей обычно пренебрегают.

Напряжение, подведенное к активному сопротивлению, по фазе совпадает с током, то есть напряжение и ток одновременно достигают максимальных значений и одновременно переходят через нуль. Если мгновенное значения тока имеет вид $i(t) = I_M \sin(2\pi ft)$, то мгновенное значение напряжения будет $u_R(t) = U_M \sin(2\pi ft)$.

Индуктивность L характеризует свойство участка цепи или катушки накапливать энергию магнитного поля. В реальной цепи индуктивностью обладают не только индуктивные катушки как элементы цепи, предназначенные для использования их индуктивности, но и провода, и выводы конденсаторов, и реостаты. В целях упрощения обычно считают, что энергия магнитного поля сосредотачивается только в катушках.

При протекании переменного тока $i(t)$ через катушку индуктивности, состоящей из w витков, возбуждается переменный магнитный поток $\Phi(t)$, который в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в ней же э.д.с. самоиндукции $e_L = -w d\Phi/dt = -L di/dt$. Следовательно, индуктивность в цепи переменного тока влияет на величину протекающего тока как сопротивление. Соответствующая расчетная величина называется индуктивным сопротивлением и

обозначается X_L и измеряется так же, как и активное сопротивление – в Омах.

Чем выше частота переменного тока, тем больше эдс самоиндукции и тем больше индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi f L$. Величина $\omega = 2\pi f$ называется угловой (циклической) частотой переменного тока.

В цепи постоянного тока в установившемся режиме индуктивность не влияет на режим работы цепи, так как э.д.с. самоиндукции равна нулю.

Поскольку э.д.с. самоиндукции возникает только при изменении тока, то и максимальные значения эдс наступают при максимальной скорости изменения тока в катушке, то есть при прохождении тока через нуль. Поэтому на участке цепи с индуктивностью эдс самоиндукции по времени отстает от тока на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Напряжение на индуктивности, будучи противоположным э.д.с., наоборот, опережает ток на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Если по катушке проходит ток, мгновенное значение которого $i(t) = I_M \sin(2\pi f t)$, то мгновенное значение напряжения на индуктивности $u_L(t) = U_M \sin(2\pi f t + \pi/2) = X_L I_M \sin(2\pi f t + \pi/2)$.

Когда напряжение, изменяясь синусоидально, достигает максимума, ток в это мгновение равен нулю. Если напряжение на зажимах элемента цепи опережает ток на $\pi/2$ радиана, то говорят, что такой элемент представляет собой идеальную катушку индуктивности или чисто реактивное индуктивное сопротивление X_L . Это сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение магнитного поля в индуктивности и является линейной функцией частоты.

При включении в цепь переменного тока реальной катушки (рис.1), обладающей кроме индуктивности L и некоторым значением активного сопротивления R , ток отстает по фазе от напряжения на некоторый угол $\varphi < \pi/2$, который легко определяется из треугольника сопротивлений (рис.3): $\operatorname{tg} \varphi = X_L / R$. Для такого участка электрической цепи уравнение на основании второго закона Кирхгофа имеет вид:

$$u = u_R + u_L = Ri + L di/dt.$$

В напряжении, подведенном к реальной катушке, условно можно выделить две составляющих: падение напряжения Ri на активном сопротивлении, обычно называемое активной составляющей приложенного напряжения, и напряжение на идеальной индуктивности $u_L = L di/dt$, называемое реактивной составляющей приложенного напряжения. Фазовые соотношения между этими составляющими, приложенным напряжением и протекаемым током обычно иллюстрируются векторной диаграммой для их действующих значений (рис.2).

Из векторной диаграммы видно, что

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ,$$

где $Z = U_M / I_M = U / I = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – полное электрическое сопротивление реальной катушки. Из треугольника сопротивлений (рис.2.3) следует, что

$$R = Z \cos \varphi, X_L = Z \sin \varphi, \varphi = \operatorname{arctg} X_L / R.$$

Закон Ома для цепи, по которой протекает переменный ток, записывается в виде $I = U / Z$.

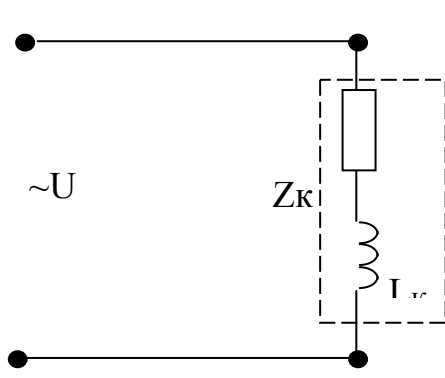


Рис. 1

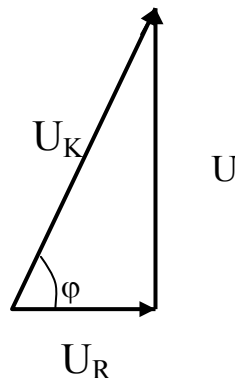


Рис. 2

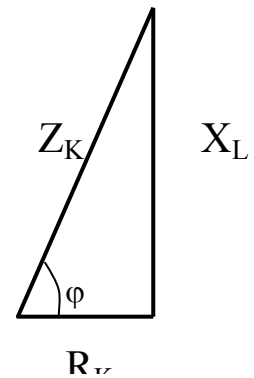


Рис. 3

Из рассмотренного следует важный вывод: **сопротивления в цепи переменного тока складываются в общем случае геометрически**. Например, если у катушки $R=3$ Ома и $X_L = 4$ Ома, то $Z = 5$ Ом.

Емкость, измеряемая в фарадах (Ф), характеризует способность элемента электрической цепи или конденсатора накапливать энергию электрического поля. В реальной цепи емкость существует не только в конденсаторах, как элементах предназначенных специально для использования их емкости, ноли между проводниками, между витками катушек (межвитковая емкость), между проводом и землей или каркасом электротехнического устройства. Однако в схемах замещения принято, что емкостью обладают только конденсаторы.

В конденсаторе, точнее в диэлектрике, разделяющем пластины или проводники конденсатора, может существовать ток электрического смещения, в точности равный току проводимости в проводниках, присоединенных к обкладкам конденсатора: $i = dq / dt$, где q – заряд на обкладках конденсатора, измеряемый в кулонах и пропорциональный напряжению на конденсаторе U_C :

$$q = C U_C \text{ и при } C = \text{const} \quad dq = C dU_C.$$

Тогда ток, проходящий через конденсатор, $i = C dU_C / dt$, а энергия электрического поля, запасаемая в конденсаторе при возрастании напряжения,

$$W = C U_C^2 / 2.$$

Очевидно, что при постоянном напряжении $dU_C / dt = 0$ и постоянный ток через конденсатор проходить не может.

При изменении напряжения на обкладках конденсатора через него протекает емкостной ток. Чем быстрее изменяется напряжение, тем больше емкостной ток.

Если приложить к конденсатору переменное синусоидальное напряжение, то через конденсатор потечет переменный синусоидальный ток, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ по отношению к напряжению. Это происходит потому, что емкостной ток достигает максимального значения при максимальном изменении напряжения, т.е. при прохождении напряжения через нуль. Ток при этом опережает напряжение по фазе на $\pi/2$. Если мгновенное значение тока, протекаемого через конденсатор $i(t) = I_M \sin(2\pi ft)$, то мгновенное значение напряжения на нем

$$u_C(t) = U_M \sin(2\pi ft - \pi/2) = X_C I_M \sin(2\pi ft - \pi/2),$$

где X_C – реактивное емкостное сопротивление. Векторная диаграмма для участка электрической цепи, содержащей конденсатор, изображена на рис. 4.

Величина $X_C = 1/2\pi fC = 1/\omega C = U_{Cm} / I_m = U_C / I$ называется реактивным емкостным сопротивлением. Это

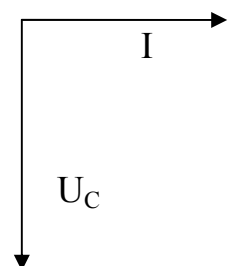


Рис. 4

сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение электрического поля в конденсаторе и является обратно пропорциональной функцией частоты.

Закон Ома для участка электрической цепи с конденсатором $I = U_C / X_C$, где I – действующее значение тока, протекаемого через конденсатор, U_C – действующее значение напряжения на конденсаторе.

Электрическая цепь переменного тока характеризуется активной, реактивной и полной мощностью.

Активная мощность P , измеряемая в ваттах (Вт), равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение ток I и на $\cos \varphi$, называемый коэффициентом мощности, или произведению квадрата действующего значения тока на активное сопротивление:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R.$$

Реактивная мощность Q , измеряемая в вольт-амперах реактивных (Вар), равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение тока I и на $\sin \varphi$ или произведению квадрата действующего значения тока на реактивное сопротивление:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X.$$

Полная мощность S , измеряемая в вольт-амперах (ВА), равна произведению действующего значения тока I на действующее значение напряжения U :

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Соотношения этих мощностей иллюстрируются треугольником мощностей (рис. 5).

Электрическая цепь синусоидального переменного тока с последовательным соединением резистора с активным сопротивлением R , реальной катушки индуктивности с полным сопротивлением $Z_K (R_K, X_K)$ и конденсатора с емкостным сопротивлением X_C (рис.6) описывается уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений на этих элементах:

$$u_R + u_K + u_C = u(t)$$

или в геометрической форме для векторов действующих значений этих напряжений

$$\bar{U}_R + \bar{U}_K + \bar{U}_C = \bar{U}.$$

Последнее соотношение говорит о том, что вектор действующего значения напряжения, приложенного к такой цепи, равен геометрической сумме векторов напряжений на отдельных её участках (рис.7).

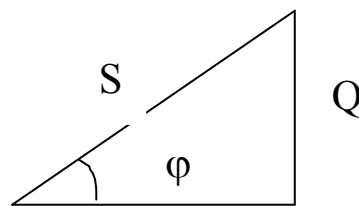


Рис. 5

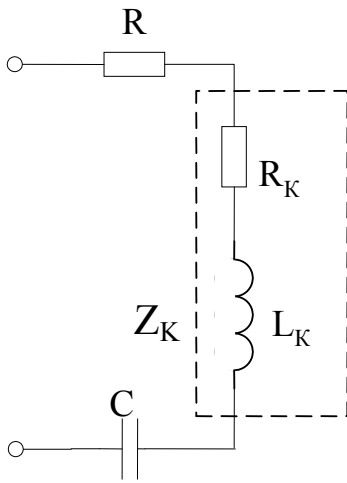


Рис. 6

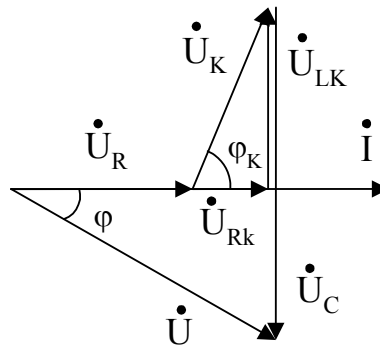


Рис. 7

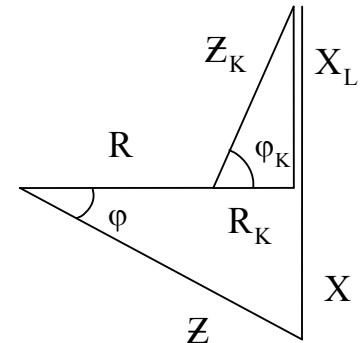


Рис. 8

Из анализа векторной диаграммы для такой цепи следует, что величина входного напряжения U

$$U = \sqrt{(U_R + U_{RK})^2 + (U_{LK} - U_C)^2} = \sqrt{(IR + IR_K)^2 - (IX_L - IX_C)^2} = I\sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где U_{RK} , U_{LK} – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения на катушке, R_K , X_L – активное и реактивное индуктивное сопротивление катушки индуктивности.

Следовательно, действующее значение тока в этой цепи на основании закона Ома можно определить как

$$I = U / Z = U / \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$\text{где } Z = \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R + R_K)^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} -$$

полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки индуктивности и конденсатора, которое легко определяется из многоугольника сопротивлений (рис. 8).

Угол сдвига фаз между входным синусоидальным напряжением U и потребляемым такой цепью током I определяется из треугольника сопротивлений

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1/\omega C) / (R + R_K).$$

Если $\omega L > 1/\omega C$ и угол $\varphi > 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и идеальной индуктивностью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-индуктивный характер.

Если $\omega L < 1/\omega C$ и угол $\varphi < 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и емкостью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-емкостной характер.

Если в цепи реактивные сопротивления равны ($\omega L = 1/\omega C$), то угол $\varphi = 0$. При этом реактивная составляющая напряжения на индуктивности и напряжение на конденсаторе полностью себя компенсируют. Цепь ведет себя, как будто реактивные сопротивления в ней отсутствуют и ток достигает наибольшего значения, поскольку ток ограничивается только эквивалентным активным сопротивлением цепи $R_{\Sigma} = R + R_K$.

Это означает, что в цепи имеет место резонанс, называемый в данном случае *резонансом напряжений*. Резонанс напряжений можно получить изменением частоты источника питания, изменением параметров реактивных элементов,

например, подбором значения величины емкости $C = 1/\omega_0^2 L$, где $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ – резонансная частота цепи.

При параллельном соединении элементов получают разветвленную цепь (рис.9).

При параллельном соединении элементов токи в отдельных ветвях зависят от величины приложенного напряжения и полного сопротивления каждой ветви. При этом ток в ветви с резистором I_R совпадает по фазе с напряжением, ток в ветви с индуктивной катушкой I_K отстает по фазе от напряжения на угол φ , зависящий от активного и реактивного сопротивления реальной катушки индуктивности. Ток в ветви с конденсатором I_C опережает напряжение на 90° (рис. 9). В соответствии с первым законом Кирхгофа общий ток I , потребляемый такой цепью от источника питания, определяется геометрической суммой токов отдельных ветвей: $\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_K + \bar{I}_C$.

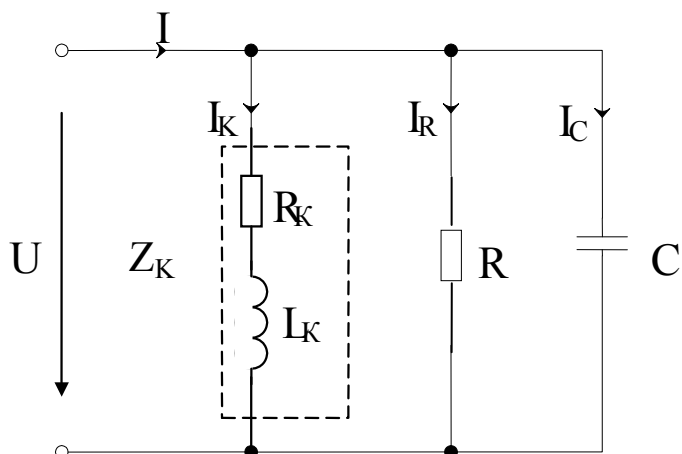


Рис. 9

Геометрическое построение для определения величины и фазы общего тока представлено на рис. 10, где обозначено:

I_{KA} , I_A – активные составляющие тока в ветви с индуктивной катушкой и общего тока;

I_{KP} , I_P – реактивные составляющие тока в ветви с индуктивной катушкой и общего тока.

Под активной составляющей тока понимают составляющую тока, совпадающую по фазе с приложенным напряжением. Под реактивной составляющей тока – составляющую, расположенную под 90° к приложенному напряжению. Следует помнить, что *активная и реактивная составляющие тока – это условные величины*, не имеющие физического смысла в последовательной схеме замещения, но удобные для расчетов.

Из векторной диаграммы следует, что

$$I_A = I_R + I_{KA} \quad , \quad I_P = I_{KP} - I_C.$$

Следовательно, величина общего тока

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_P^2},$$

а угол сдвига фаз между общим током и приложенным напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = I_P / I_A = (I_{KP} - I_C) / (I_R + I_{KA}).$$

Данная векторная диаграмма построена в предположении, что емкостной ток I_C меньше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} . Поэтому общий ток отстает по фазе от напряжения. Такая цепь носит активно-индуктивный характер. Если бы емкостной ток I_C был больше реактивной индуктивной

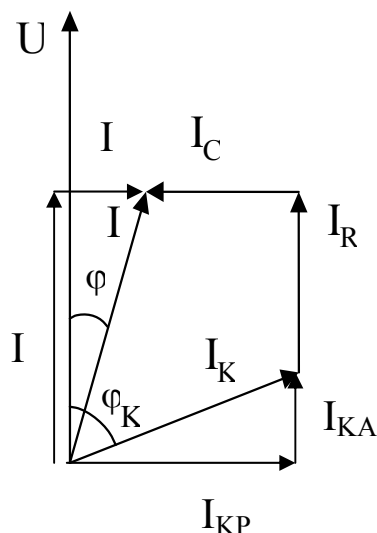


Рис. 10

составляющей тока в катушке I_{KP} , то ток, потребляемый цепью из сети опережал по фазе приложенное напряжение и цепь носила бы активно-емкостной характер.

При равенстве реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} и емкостного тока I_C вектор общего тока совпадает по фазе с вектором приложенного напряжения, а его величина определяется только активными составляющими токов $I_A = I_R + I_{KA}$. При этом в цепи наступает явление резонанса токов, так как цепь, содержащая реактивные элементы, ведет себя как цепь с чисто активным сопротивлением. При резонансе токов токи в ветвях с реактивными элементами могут значительно превышать ток, потребляемый от источника питания.

Трехфазная система переменного тока имеет ряд преимуществ по сравнению с однофазным переменным током и поэтому получила широкое применение. Чаще всего электрическая энергия вырабатывается, передается и распределяется между потребителями трехфазными системами. Подавляющее большинство электродвигателей является двигателями трехфазного переменного тока.

Чтобы в трехфазной системе можно было одновременно пользоваться двумя различными напряжениями (например, 380 В – для питания электродвигателей и 220 В – для питания электрических ламп и других однофазных потребителей) применяют четырехпроводную систему электроснабжения. Четырехпроводная линия трехфазной системы имеет четыре провода: три линейных, по которым протекают линейные токи I_A , I_B , I_C и один нулевой (нейтральный) провод, предназначенный для поддержания одинаковых значений фазных напряжений на всех трех фазах потребителя. По нулевому проводу может протекать уравнивающий ток I_0 , называемый нулевым или нейтральным током. Такая система соединения обмоток трехфазного генератора и приемников (потребителей) называется «звездой» и показана на рис. 11.

При соединении в звезду ток I_A , протекаемый по фазе источника питания, равен току, протекаемому по линейному проводу фазы A . Этот же ток протекает и по фазе A потребителя. Следовательно, при соединении в звезду фазный ток I_ϕ равен линейному току I_L :

$$I_\phi = I_L.$$

Напряжение между линейными проводами, называемое линейным напряжением (например, U_{AB}), оказывается в $\sqrt{3}$ раз больше, чем фазное напряжение источника питания U_A , U_B или U_C :

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi.$$

Если трехфазная система симметричная (все сопротивления и мощности фазных потребителей одинаковы), то по всем трем фазам протекают одинаковые по величине токи, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120° . Ток в нейтральном проводе при этом равен нулю. Напряжения на всех фазах потребителя также отличаются друг от друга только по начальной фазе на 120° (рис. 12).

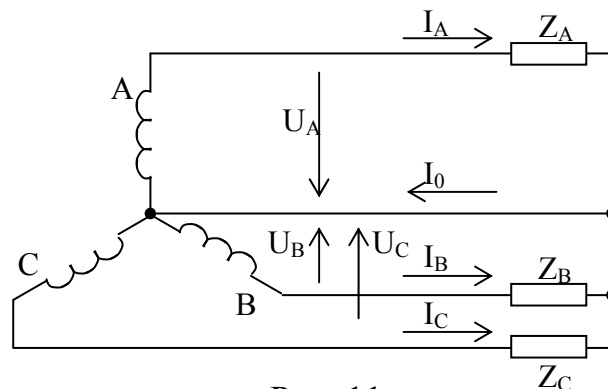


Рис. 11

При включении в разных фазах различных по мощности потребителей (несимметричная нагрузка), токи каждой фазы (в каждом линейном проводе) отличаются друг от друга не только начальной фазой, но и величиной. По

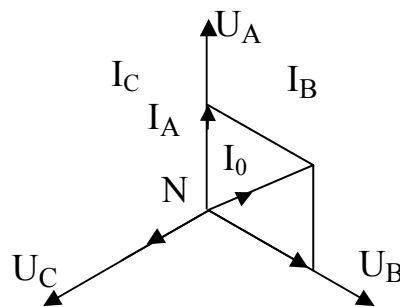
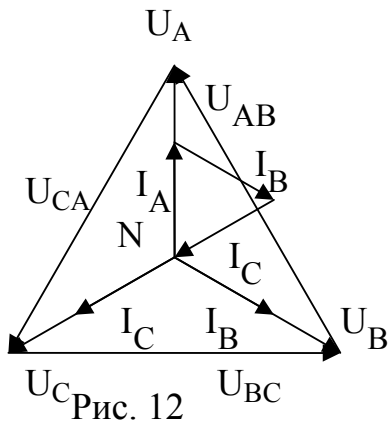


Рис. 13

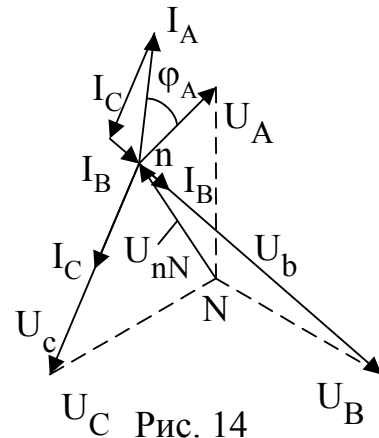


Рис. 14

нейтральному проводу при этом протекает ток, вектор которого на основании первого закона Кирхгофа равен геометрической сумме векторов фазных токов (рис.13)

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_0.$$

Обрыв нейтрального провода (трехпроводная система) при несимметричной нагрузке приводит к изменению напряжений на всех фазах потребителей и появлению напряжения смещения нейтрали U_{Nn} (рис. 14). Положение точки «n» на векторной диаграмме при измеренных значениях напряжений на фазах потребителей $U_{АП}$, $U_{ВП}$ и $U_{СП}$ может быть определено методом засечек (рис. 15) или рассчитано аналитически.

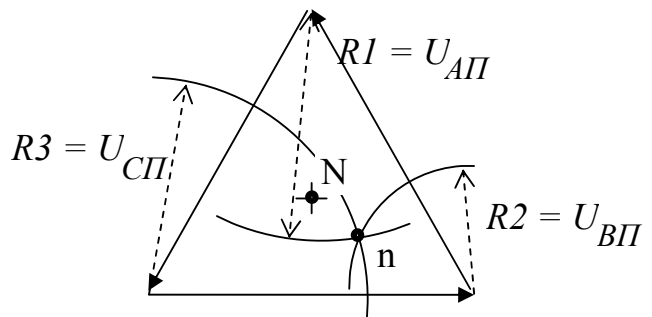


Рис. 15

Потребители электрической энергии при питании от трехфазного источника, как и источники электрической энергии, могут быть соединены в треугольник (рис. 16).

Следует помнить, что схема включения обмоток трехфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в звезду нагрузка может быть соединена в звезду с нейтральным проводом, в звезду без нейтрального провода или в треугольник.

При соединении в треугольник симметричной трехфазной нагрузки линейные напряжения оказываются равными фазным напряжениям $U_\phi = U_L$, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше, чем токи в фазах потребителя:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi.$$

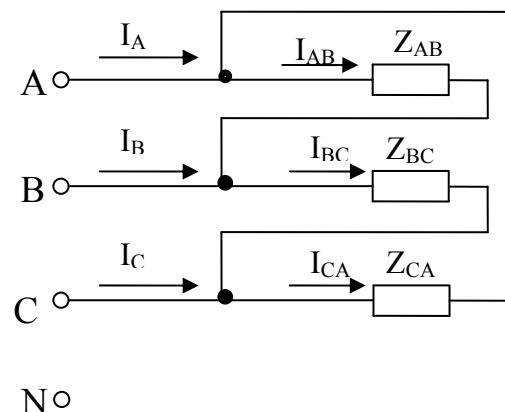


Рис. 16

При этом все фазные токи равны по величине и отличаются друг от друга по фазе на 120° . То же самое относится и к линейным токам (рис. 17).

При несимметричной нагрузке связь между линейными и фазными токами выражается уравнениями, записанными на основании первого закона Кирхгофа в комплексной или векторной форме:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

При соединении в треугольник нулевой провод отсутствует, но все фазные потребители в этом случае должны быть рассчитаны на номинальное линейное напряжение.

Важным элементом конструкции различных электрических машин и аппаратов, устройств электроавтоматики является катушка индуктивности. При протекании тока по виткам катушки создается магнитное поле, интенсивность которого характеризуется магнитной индукцией B и магнитным потоком Φ , который пропорционален намагничивающей (магнитодвижущей) силе $F = I\omega$, равной произведению тока I катушки на число её витков ω . Зависимость $\Phi(I)$ при отсутствии ферромагнитного магнитопровода (сердечника) является линейной.

При наличии сердечника магнитный поток, создаваемый такой катушкой при прочих равных условиях значительно возрастает, так как в этом случае магнитный поток создается не только проводниками с током (источником внешнего магнитного поля), но и соответствующим ферромагнитным веществом магнитопровода (источником внутреннего магнитного поля).

Магнитная индукция B катушки индуктивности связана с напряженностью H магнитного поля и магнитной проницаемостью μ известным соотношением $B = \mu H$, магнитный поток $\Phi = BS = \mu HS$, где S – поперечное сечение катушки.

Отсюда следует, что магнитный поток пропорционален магнитной проницаемости среды μ , которая для ферромагнитных материалов значительно больше, чем магнитная проницаемость других материалов. Поэтому для уменьшения намагничивающей силы F , а следовательно, и для уменьшения тока, необходимого для создания требуемого магнитного потока, катушки индуктивности снабжаются магнитопроводом (сердечником) из ферромагнитного материала, чаще всего из электротехнической стали.

Так как зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов $\mu(H)$ является нелинейной (рис. 18), то и зависимость $\Phi(H)$ или $B(H)$ при наличии магнитопровода оказывается тоже нелинейной. Зависимость $B(H)$ – кривая намагничивания – является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов (рис. 19). Кривая, проходящая через начало координат, является основной кривой намагничивания. Она снимается при одностороннем намагничивании ненамагниченного предварительно материала.

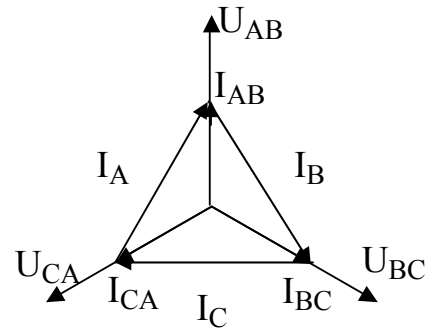


Рис. 17

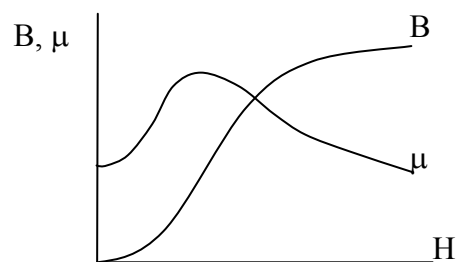


Рис. 18

При питании катушки переменным током ферромагнитный магнитопровод из-за переменного магнитного потока циклически, с частотой тока перемагничивается по кривой гистерезиса, обусловленной наличием остаточной магнитной индукции B_0 и коэрцитивной силы H_C (рис. 19). За несколько полупериодов переменного тока в процессе циклического перемагничивания устанавливается замкнутая симметричная петля гистерезиса.

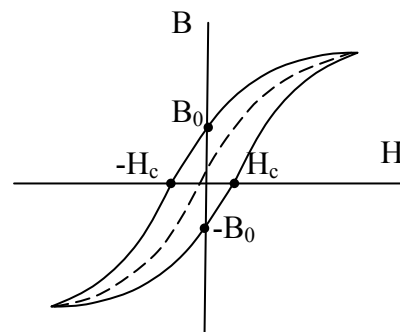


Рис. 19

На циклическое перемагничивание магнитопровода затрачивается мощность, выделяемая в виде теплоты, которая относится к потерям мощности в магнитопроводе. Потери мощности в магнитопроводе (потери мощности в стали) $P_{СТ}$ включают в себя потери на гистерезис P_H и потери от вихревых токов P_{BT} , наводимых переменным магнитным потоком в металле магнитопровода, : $P_{СТ} = P_H + P_{BT}$.

Для уменьшения потерь мощности на гистерезис в качестве материала для магнитопровода используют ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса. Уменьшение потерь мощности на вихревые токи достигается применением для магнитопровода металлов с большим удельным электрическим сопротивлением за счет повышенного содержания кремния в металле. При этом магнитопровод собирается из тонких электрически изолированных друг от друга пластин, что способствует уменьшению наводимых в каждой пластине вихревых токов и снижению потерь мощности от этих токов.

При питании синусоидальным напряжением ток в катушке с ферромагнитным сердечником искажает свою форму и является несинусоидальным во времени. На рис. 20 показано построение кривой тока в катушке с ферромагнитным сердечником с учетом магнитного гистерезиса. Из рисунка видно, что начальные фазы магнитного потока и тока не совпадают (угол сдвига δ). В связи с этим первая гармоника тока (или эквивалентный ток) отстает от приложенного напряжения на угол $\varphi < 90^\circ$. Наличие сдвига по фазе между напряжением и током меньше, чем 90° указывает на то, что активная мощность в цепи не равна нулю даже если активное сопротивление обмотки катушки равно нулю. Поэтому ток катушки из-за потерь на гистерезис имеет активную составляющую I_A , а средняя мощность за период не равна нулю. Эта активная мощность характеризует расход энергии на перемагничивание ферромагнитного сердечника.

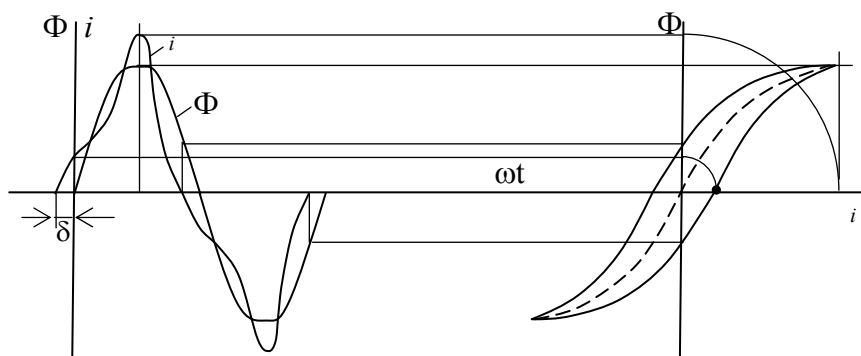


Рис. 20

При наличии несинусоидальных токов для упрощения расчетов обычно переходят к эквивалентному синусоидальному току $I_{ЭК}$, имеющему одинаковое с соответствующим несинусоидальным током действующее значение при

одинаковой частоте и развивающему одинаковую с ним активную мощность при одинаковом значении коэффициента мощности

$$I = \sqrt{1/T \int_0^T i^2 dt} = I_{ЭК} = I_{mЭК} / \sqrt{2};$$

$$\cos \varphi = P/UI = \cos \varphi_{ЭК} = P/U I_{ЭК}$$

Полное сопротивление катушки индуктивности с магнитопроводом при расчетах находят по закону Ома

$$Z_{ЭК} = U/I.$$

Эквивалентное активное сопротивление катушки определяют при этом по значению активной мощности P , потребляемой катушкой из питающей сети, и её току или по значению потерь мощности в сердечнике $P_{СТ}$ и активному сопротивлению R проводов катушки

$$R_{ЭК} = P/I^2 = P_{СТ}/I^2 + R.$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление катушки

$$X_{ЭК} = \sqrt{Z_{ЭК}^2 - R_{ЭК}^2}.$$

При этом индуктивность катушки $L = X_{ЭК}/\omega = X/2\pi f$.

При увеличении амплитуды напряжения на катушке индуктивности с ферромагнитным сердечником амплитуда и действующее значение тока в ней будут возрастать быстрее. В результате вольтамперная характеристика катушки с ферромагнитным сердечником оказывается нелинейной (рис. 21). По форме она повторяет кривую намагничивания сердечника $B(H)$.

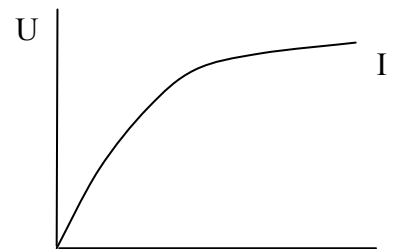


Рис. 21

В цепях, содержащих катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор, резонансные явления, связанные с нелинейным характером индуктивности, называются феррорезонансом. В отличие от линейной цепи феррорезонанс может наступить в такой цепи при изменении тока в цепи или приложенного напряжения без какой либо регулировки катушки или конденсатора. На рис. 22 показана вольтамперная характеристика последовательной цепи, в которой возможен феррорезонанс напряжений. Вольтамперная характеристика емкости (2) пересекает вольтамперную характеристику катушки (1). Точка пересечения А является точкой резонанса. В этой точке U_L и U_C одинаковы, а их разность равна нулю. При непрерывном увеличении напряжения источника ток плавно растет до I_2 , затем скачком увеличивается до I_4 и далее плавно растет. При уменьшении напряжения ток плавно уменьшается до I_3 , затем скачком до I_1 и снова плавно падает. Скачкообразное изменение тока сопровождается изменением на 180° фазы тока по отношению к напряжению (опрокидывание фазы).

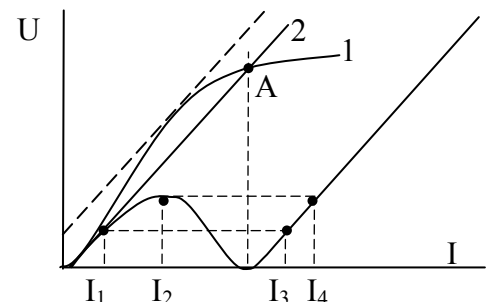


Рис. 22

Явление резкого изменения тока в цепи при незначительных изменениях напряжения на входе цепи иногда называют триггерным эффектом в последовательной

феррорезонансной цепи. Он имеет место при малых значениях активного сопротивления цепи.

При напряжениях источника, больших напряжения опрокидывания фазы, напряжение на катушке изменяется мало, что связано с переходом по характеристике намагничивания в область магнитного насыщения. Это используется в практике для стабилизации напряжения.

Ограничители амплитуды – это устройства, у которых выходное напряжение изменяется пропорционально входному до некоторого значения, называемого уровнем ограничения. После этого значение выходного напряжения не зависит от входного и остается постоянным (рис.23).

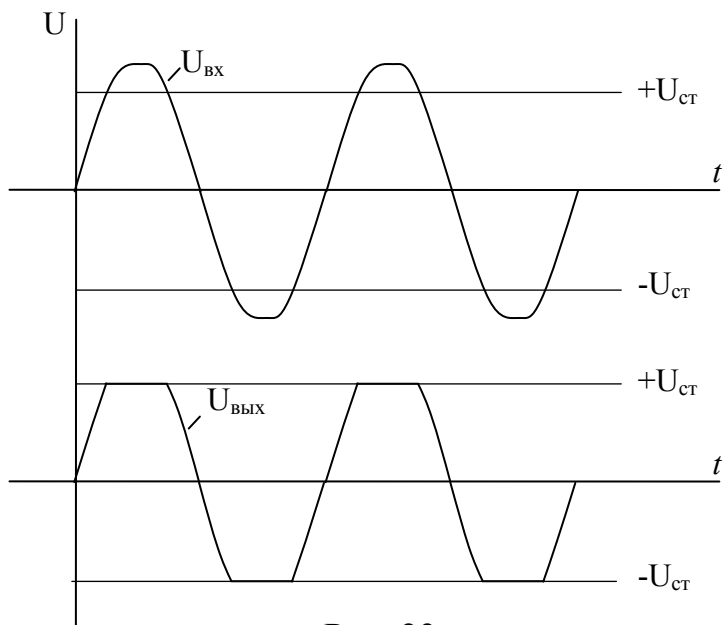


Рис. 23

В низкочастотных устройствах часто используют ограничители на стабилитронах (рис.24). Вольтамперная характеристика двуханодного стабилитрона показана на рис. 24. С помощью этих устройств легко формировать трапецеидальное напряжение из синусоидального напряжения (рис. 25). Если амплитуда $U_{BX} \gg U_{CT}$ можно получить напряжение, близкое по форме к прямоугольным импульсам.

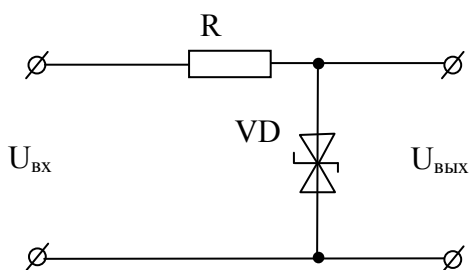


Рис. 24

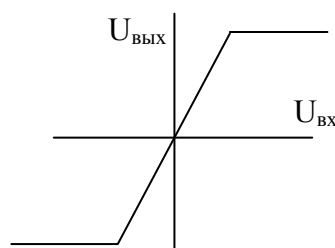


Рис. 25

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, преобразующий параметры электрической энергии переменного тока и передающий эту энергию из одной цепи в другую. С помощью трансформатора можно преобразовывать основные параметры электрической энергии переменного тока (ток, напряжение). Электрическая мощность при этом остается почти неизменной. В зависимости от соотношения номинальных напряжений у трансформатора различают обмотку высшего напряжения и обмотку низшего напряжения.

Коэффициент трансформации по напряжению показывает, как соотносится число витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки, а также э.д.с., индуцируемые в обмотках

$$K_{12} = \omega_1 / \omega_2 = E_1 / E_2 .$$

Коэффициент трансформации можно определить с достаточной точностью,

измерив при холостом ходе трансформатора (вторичная обмотка разомкнута) напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток.

В режиме холостого хода трансформатор потребляет из сети электрическую энергию, которая идет на потери в стали (из-за вихревых токов и перемагничивания магнитопровода). Опыт холостого хода позволяет определить состояние стали трансформатора.

Подключение потребителей электрической энергии к трансформатору позволяет передавать им энергию, повышая или понижая напряжение. В данной работе исследуется однофазный понижающий трансформатор, который одновременно в таком же соотношении увеличивает силу тока

$$K_{12} = \omega_1 / \omega_2 \approx U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1.$$

Так как первичная и вторичная обмотки трансформатора электрически не соединены, электрическая мощность из первичной обмотки во вторичную обмотку передается при помощи магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу (сердечнику) трансформатора.

Мощность, потребляемая трансформатором, больше мощности, отдаваемой трансформатором потребителю, на величину потерь в самом трансформаторе. Потери мощности в обмотках и сердечнике трансформатора невелики. Полная номинальная мощность трансформатора обычно определяется как $S_H = U_H I_H$,

где U_H – номинальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

I_H – номинальный ток вторичной обмотки трансформатора.

С увеличением нагрузки от холостого хода до номинальной напряжение на зажимах вторичной обмотки понижается из-за увеличения падения напряжения на внутреннем сопротивлении трансформатора. При этом увеличивается и ток, потребляемый трансформатором из сети, а общий магнитный поток в сердечнике трансформатора остается практически постоянным. Зависимость величины вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 при неизменном первичном напряжении U_1 и частоте называется внешней характеристикой. Наклон внешней характеристики зависит от коэффициента мощности потребителя (характера потребителя).

Работа трансформатора описывается также рабочими характеристиками, к которым относятся зависимости I_1 , U_2 , $\cos \varphi_1$, $\eta = f(P_2)$ при $U_{1H} = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$, где $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ – активная мощность трансформатора, отдаваемая нагрузке. Рабочие характеристики снимаются для выбора оптимальной зоны работы трансформатора.

Работа № 2-1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Приобретение навыков определения параметров элементов в цепях переменного тока по результатам измерений, включения в цепь вольтметра и амперметра, измерения тока и напряжения, применения закона Ома в цепи переменного тока.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Батарея конденсаторов	1
Дроссель	1
Резистор	2

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры PA1...PA4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Провести измерение значения **активного сопротивления** индуктивного потребителя R_K следующим образом. Установить на наборном поле в качестве индуктивного потребителя Z_K дроссель L . Установить на мультиметре **режим измерения сопротивления** и подключить его к выводам индуктивного потребителя Z_K . После проверки схемы преподавателем результат записать в табл. 1. Выключить мультиметр (перевести в режим «OFF»).

2.3. Собрать электрическую цепь для определения величины индуктивности L индуктивного потребителя (рис. 1). В качестве вольтметра использовать мультиметр **в режиме измерения переменного напряжения**. Предъявить схему для проверки преподавателю.

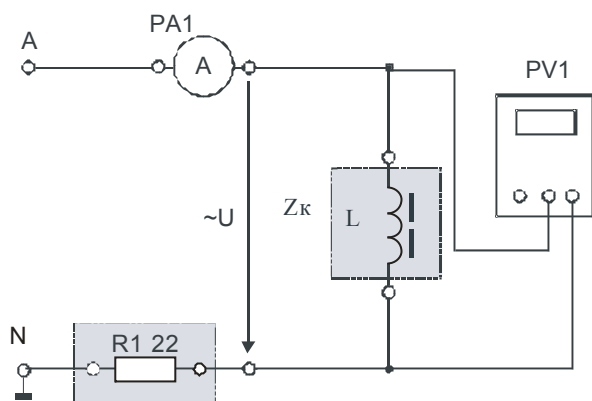


Рис. 1

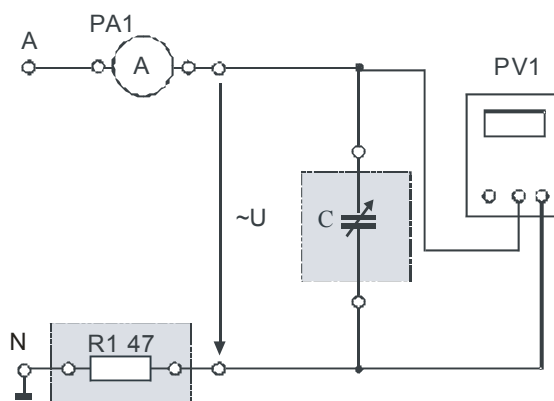


Рис. 2

2.4. Включить источник питания (выключатель SA3) и записать в табл. 1 показания амперметра и вольтметра (мультиметра). Выключить источник питания.

Таблица 1

2 R_K , Ом	U, В	I, мА	$Z_K = U/I$, Ом	X_K , Ом	L, Гн
2					

2.5. Собрать электрическую цепь для определения величины емкости C емкостного потребителя (рис. 2). Установить заданное преподавателем положение переключателя батареи конденсаторов. Предъявить схему для проверки преподавателю.

2.6. Включить электропитание и записать в табл. 2 показания приборов, устанавливая поочередно заданные преподавателем положения переключателя батареи конденсаторов.

Таблица 2

Включено	C1	C2	C3
U, В			
I, А			
X_C , Ом			
C, мкФ			

2.7. По результатам измерений рассчитать, используя закон Ома, полное сопротивление индуктивного потребителя Z_K .

2.8. По результатам измерений рассчитать, используя закон Ома, емкостные сопротивления X_C . Результаты записать в табл. 2.

2.9. Считая, что частота переменного напряжения $f = 50$ Гц, определить величину индуктивности индуктивного потребителя L и емкостей конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$. Результаты занести в соответствующие таблицы.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы опытов;
- в) таблицы с результатами опытов и вычислений;
- г) расчетные соотношения;
- д) векторные диаграммы для резистора, реальной катушки и конденсатора;
- е) выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряется ток, напряжение, сопротивление?
2. Что такое Ом, Ампер, Вольт?
3. Что такое «полное сопротивление»?
4. Что такое «активное сопротивление»?
5. Что такое «реактивное индуктивное сопротивление» и как оно определяется?
6. Что такое «реактивное емкостное сопротивление» и как оно определяется?
7. Какая связь между полным, активным и реактивным сопротивлениями цепи переменного тока?
8. Как формулируется закон Ома для цепи переменного тока?
9. Может ли через конденсатор протекать постоянный ток?

Работа № 2-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

Приобретение навыков сборки простых электрических цепей и измерения напряжений на отдельных участках цепи, изучение свойств цепей при последовательном соединении активных и реактивных элементов, знакомство с явлением резонанса напряжений, построение векторных диаграмм.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Батарея конденсаторов	1
Дроссель	1
Резистор 2 Вт 47 Ом	1

2. Порядок выполнения работ

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением элементов, установив минимодули резистора, батареи конденсаторов, дросселя L, используемого в качестве индуктивного потребителя Z_K (рис. 1). Подключить собранную цепь к источнику переменного напряжения (клеммы «А-Н» источника питания). Для измерения напряжений на отдельных участках цепи использовать мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. Установить переключатель батареи конденсаторов в заданную преподавателем позицию.

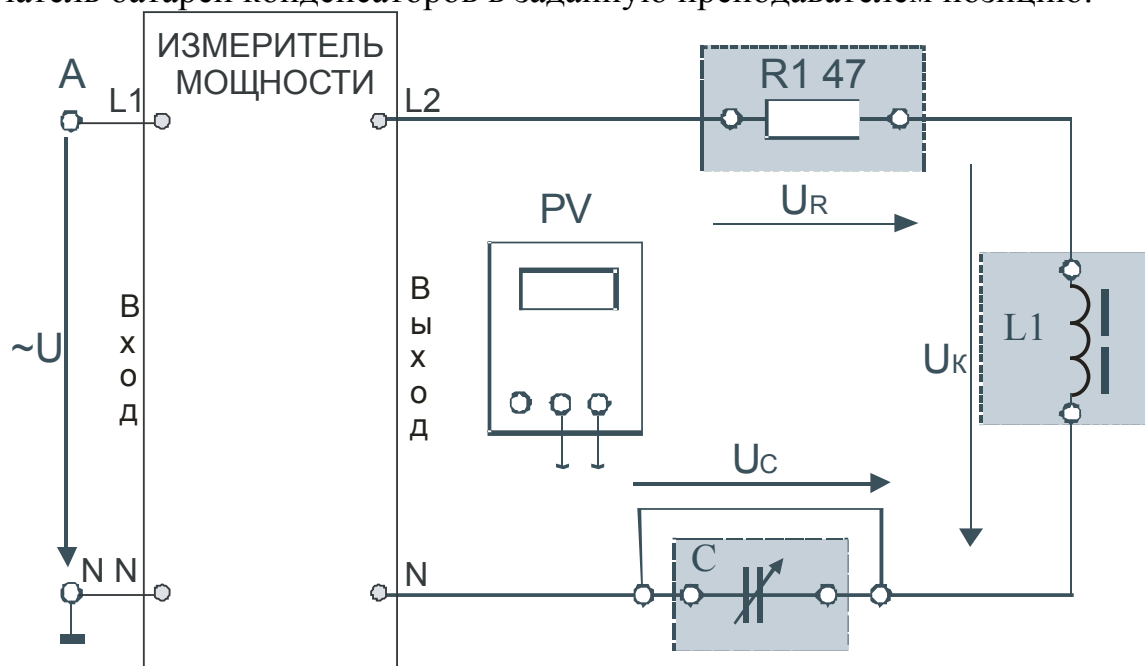


Рис. 1

2.3. Подсоединить параллельно конденсатору дополнительный проводник (исключив этим конденсатор из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.

2.4. Включить источник питания (выключатель SA3), измеритель мощности (SA2), а также мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. Произвести измерения указанных в таблице 1 величин в цепи с последовательным соединением резистора R и индуктивного потребителя Z_K . Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Схема	U , В	I , мА	U_R , В	U_K , В	U_C , В	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	$\cos \varphi$	φ
Z_K, R										
R, X_C										
R, Z_K, X_C										

2.5. Выключить электропитание, убрать дополнительный проводник, подключенный к конденсатору. Подсоединить параллельно индуктивному потребителю Z_K дополнительный проводник (исключив этим его из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.

2.6. Включить электропитание и произвести измерения указанных величин для цепи с последовательным соединением резистора R и конденсатора X_C . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание, убрать дополнительный проводник.

2.7. Включить электропитание и произвести измерения указанных в таблице величин для цепи с последовательным соединением резистора R , конденсатора X_C и индуктивного потребителя Z_K . Результаты измерений занести в табл. 1.

2.8. Изменяя величину емкости батареи конденсаторов, добиться наибольшего значения тока, т.е. обеспечить состояние цепи близкое к резонансу напряжений. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Схема	U , В	I , мА	U_R , В	U_K , В	U_C , В	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	$\cos \varphi$	φ
$R, Z_K, X_{Cрез}$										
R, Z_K, X_{C1}										
R, Z_K, X_{C2}										
R, Z_K, X_{C3}										
R, Z_K, X_{C4}										

2.9. Уменьшая и увеличивая величину емкости батареи конденсаторов (от резонансного значения емкости) создать в цепи два режима до резонанса напряжений и два режима после резонанса. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить электропитание.

2.10. Для цепи с последовательным соединением трех элементов (R, Z_K, C) по результатам измерений при резонансе напряжений рассчитать величины, указанные в табл. 3: активные и реактивные мощности отдельных участков P_R и P_K , Q_K и Q_C , коэффициент мощности индуктивного потребителя $\cos \varphi_K$ и угол сдвига фаз φ_K между напряжением на индуктивном потребителе U_K и током, а также полное сопротивление цепи Z , активные сопротивления резистора и индуктивного потребителя R и R_K , реактивные сопротивления индуктивного

потребителя X_K и конденсатора X_C , величину полного сопротивления индуктивного потребителя Z_K . Результаты занести в табл. 3.

Таблица 3

Схема	$P_R,$ Вт	$P_K,$ Вт	$Q_K,$ ВАр	$Q_C,$ ВАр	$\cos\varphi_K$	φ_K	$Z,$ Ом	$R,$ Ом	$R_K,$ Ом	$X_K,$ Ом	$Z_K,$ Ом	$X_C,$ Ом
$R, Z_K, X_{Cрез}$												

2.11. По результатам измерений построить для исследованных цепей в масштабе векторные диаграммы и сделать вывод о характере каждой исследованной цепи.

2.12. Построить зависимости потребляемого тока I , полного сопротивления цепи Z_{Σ} , реактивного сопротивления цепи X_{Σ} , угла сдвига фаз φ в цепи с последовательным соединением трех элементов (R, Z_K, C) от величины емкостного сопротивления X_C : $I = f(X_C)$; $Z_{\Sigma} = f(X_C)$; $X_{\Sigma} = f(X_C)$; $\varphi = f(X_C)$.

2.13. Сделать вывод о применении 2-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование работы и цель работы;
- схему исследуемой цепи;
- таблицы с результатами опытов и вычислений;
- расчетные соотношения;
- векторные диаграммы;
- выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

- Что такое активная, реактивная и полная мощности в цепи переменного тока?
- Какая взаимосвязь между полной, активной и реактивной мощностями?
- Что такое «коэффициент мощности»?
- Как вычислить полное сопротивление катушки, если известны её активное сопротивление, индуктивность и частота сети?
- Как вычислить полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки и конденсатора?
- От чего зависит угол сдвига фаз между напряжением и током на участке электрической цепи переменного тока?
- Что такое «треугольник сопротивлений»?
- Чему равны реактивное сопротивление цепи и реактивная мощность цепи при резонансе?
- В каком случае исследуемая цепь будет носить активно-индуктивный характер и в каком – активно-емкостной характер?

Работа № 2-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

Ознакомиться с особенностями режимов работы цепи с параллельным соединением активных и реактивных элементов, явлением резонанса токов, повышением коэффициента мощности, применением 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Батарея конденсаторов	1
Дроссель	1
Резистор 2 Вт 100 Ом	1
Тумблер	3

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора R , индуктивного потребителя Z_K и батареи конденсаторов C (рис. 1). Установить в заданную преподавателем позицию переключатель батареи конденсаторов C . В качестве индуктивного потребителя Z_K использовать дроссель L . Схему предъявить для проверки преподавателю.

2.3. Изучить работу электрической цепи при параллельном соединении различных потребителей (см. табл. 1). Включить электропитание стенда, источник питания и измеритель мощности. Поочередно подключая тумблерами соответствующие ветви, измерить величины, указанные в табл. 1. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник питания.

2.4. Исследовать влияние емкости C , включенной параллельно индуктивному потребителю Z_K , на коэффициент мощности цепи и величину тока I , потребляемого от источника питания. Для этого разомкнуть ветвь с резистором R . Переключатель батареи конденсаторов C установить в позицию «1» ($C=0$). Включить источник питания. При наличии в цепи только индуктивного потребителя Z_K измерить величины, указанные в табл. 2. Установить такое значение емкости батареи конденсаторов, при которой от источника электропитания потребляется минимальный ток I (состояние цепи, близкое к резонансу токов). Измерить величины, указанные в табл. 2. Уменьшая и увеличивая величину емкости батареи конденсаторов (от резонансного значения емкости) создать в цепи два режима до резонанса токов и два режима после резонанса. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить источник питания.

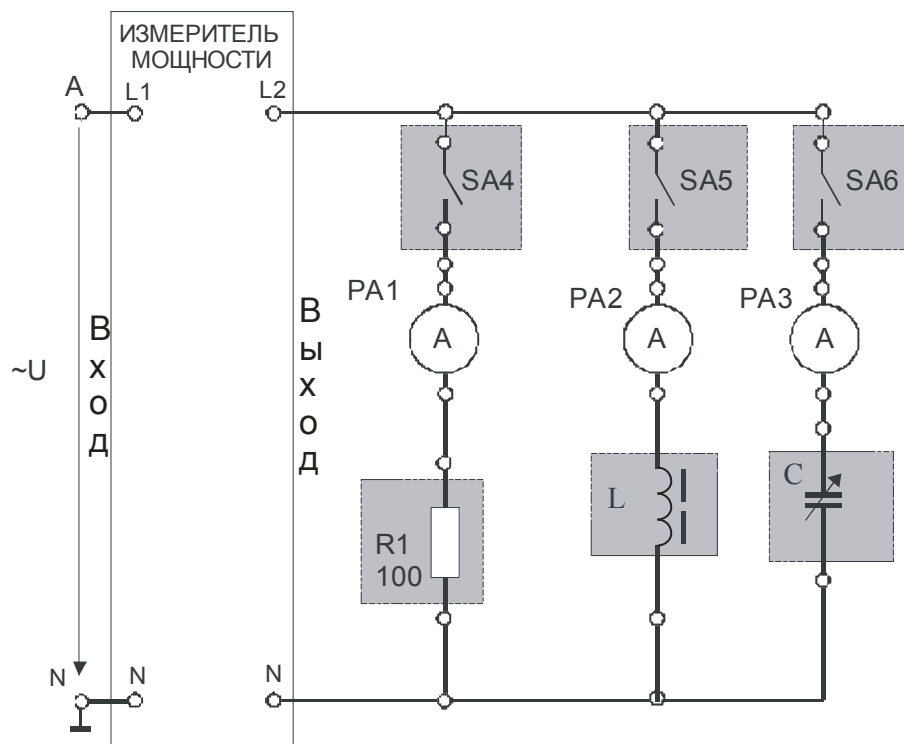


Рис. 1.

Таблица 1

Схема	U, В	I, мА	I _R , мА	I _K , мА	I _C , мА	P, Вт	Q, ВАр	S, ВА	cos φ	φ
Z _K , R										
R, X _C										
R, Z _K , X _C										

2.5. По результатам измерений (табл. 2) рассчитать величину емкостного сопротивления X_C и величину емкости батареи конденсаторов C . Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

Схема	U, В	I, мА	I _K , мА	I _C , мА	P, Вт	Q, ВАр	S, ВА	cos φ	φ	X _C , Ом	C, мкФ
Z _K										-----	-----
Z _K , X _C рез											
Z _K , X _C 1											
Z _K , X _C 2											
Z _K , X _C 3											
Z _K , X _C 4											

2.6. Построить графики зависимостей $\cos \varphi = f(C)$, $I = f(C)$, $I_K = f(C)$, $I_C = f(C)$, $P = f(C)$.

2.7. По опытным данным построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для каждого опыта.

2.8. Сделать выводы:

- о влиянии параллельно включенных потребителей друг на друга;
- о влиянии конденсатора, подключенного параллельно индуктивному потребителю, на величину тока, потребляемого из сети, активной мощности цепи и коэффициент мощности цепи;
- о применении 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока;

3. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) схему эксперимента и таблицу полученных результатов;
- в) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- г) выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Как при параллельном включении потребителей определить величину тока, потребляемого из сети?
2. С какой целью повышают коэффициент мощности цепи?
3. Как можно определить коэффициент мощности цепи?
4. Как изменятся величина тока, потребляемого из сети, и активная мощность цепи, если параллельно активно-индуктивному потребителю включить конденсатор?
5. Почему уменьшается ток, потребляемый из сети, при подключении параллельно индуктивному потребителю конденсатора?
6. Как применяется 1-й закон Кирхгофа в цепях переменного тока?
7. Как построить векторную диаграмму цепи, которая содержит параллельно включенные индуктивную катушку и конденсатор?
8. Что такое «резонанс токов»? При каком условии он возникает?

Работа № 2-4. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

1. Цель работы

Ознакомиться с трехфазными системами, измерением фазных и линейных токов и напряжений. Проверить основные соотношения между токами и напряжениями симметричного и несимметричного трехфазного потребителя. Выяснить роль нейтрального провода в четырехпроводной трехфазной системе. Научиться строить векторные диаграммы напряжений и токов.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Резистор 2 Вт 100 Ом	1
Резистор 2 Вт 120 Ом	1
Резистор 2 Вт 150 Ом	3
Тумблер	2

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Установить мультиметр в **режим измерения переменного напряжения**, цифровые амперметры – в режим измерения переменного тока. Включить источник питания (выключатель SA3) и измерить линейные и фазные напряжения трехфазного источника питания на холостом ходу. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник питания.

Таблица.1

Измерено на клеммах источника питания						Вычислено		
Линейные напряжения			Фазные напряжения					
U _{AB} , В	U _{BC} , В	U _{CA} , В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	U _Л , В	U _Ф , В	U _Л /U _Ф

2.3. Собрать симметричную трехфазную электрическую цепь (рис. 1). Замкнуть тумблеры SA4 и SA5. Предъявить схему для проверки преподавателю.

2.4. Включить источник питания. Измерить токи, фазные и линейные напряжения при включенном нейтральном проводе (тумблер SA5 замкнут). Результаты занести в табл. 2. Проверить соотношение между линейными и фазными напряжениями потребителей.

2.5. Разомкнуть тумблер SA5. Повторить те же измерения при отключенном нейтральном проводе. Результаты занести в табл. 2. Выключить источник трехфазного напряжения.

2.6. Исследовать влияние обрыва линейного провода на режим работы цепи при наличии нейтрального провода. Для этого разомкнуть тумблер SA4 и замкнуть тумблер SA5. Включить источник трехфазного напряжения. Измерить токи и напряжения. Результаты занести в табл. 2. Выключить источник трехфазного напряжения.

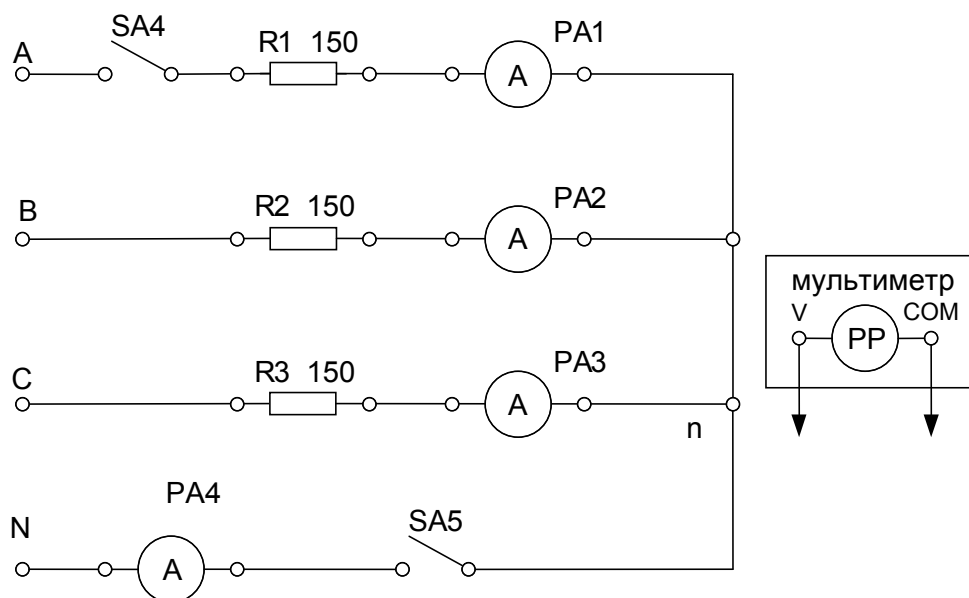


Рис. 1

2.7. Исследовать несимметричную трехфазную цепь. Для этого собрать схему по рис. 2. Предъявить схему для проверки преподавателю. Измерить токи, линейные и фазные напряжения в каждой фазе потребителя при наличии нейтрального провода. Результаты записать в табл. 2.

2.8. Разомкнуть цепь нейтрального провода с помощью тумблера SA4 и вновь измерить токи и напряжения. Результаты записать в табл. 2.

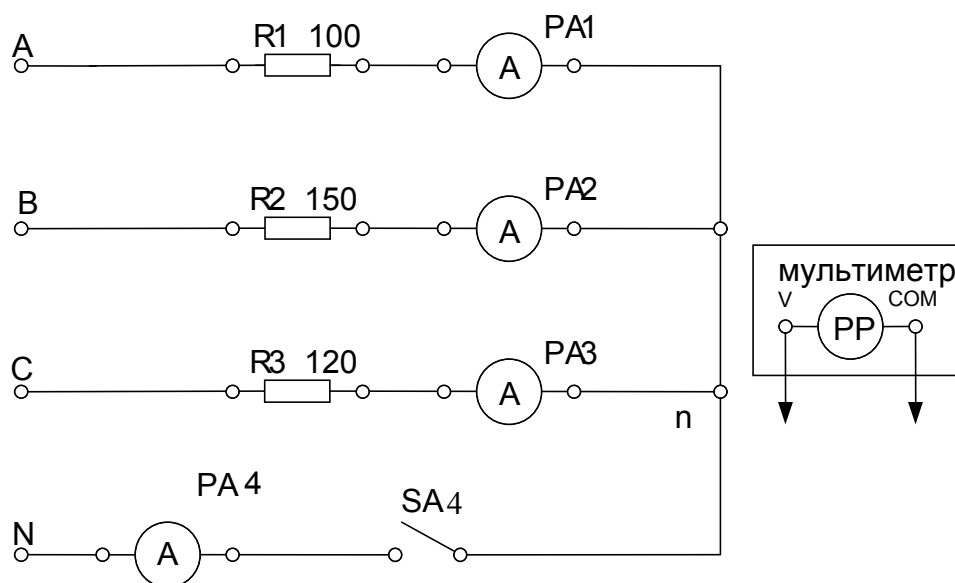


Рис. 2

2.9. По результатам измерений вычислить

- среднее значение линейных напряжений U_L источника питания;
- среднее значение фазных напряжений U_Φ источника питания;
- отношение U_L/U_Φ ;
- среднее значение тока при симметричной нагрузке.

2.10. Для всех проведенных опытов методом засечек построить в масштабе векторные диаграммы.

2.11. Сравнить влияние нейтрального провода на работу трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузке.

Таблица 2

Режим нагрузки	Токи, мА				Напряжения, В						
	I_A	I_B	I_C	I_0	Фазные			Линейные			U_{nN}
					$U_{АП}$	$U_{ВП}$	$U_{СП}$	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	
Нейтральный провод включен, нагрузка симметричная											
Нейтральный провод выключен, нагрузка симметричная											
Нейтральный провод включен, обрыв линейного провода											
Нейтральный провод включен, нагрузка несимметричная											
Нейтральный провод выключен, нагрузка несимметричная											

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные электроизмерительных приборов;
- в) схему эксперимента с включенными измерительными приборами;
- г) таблицы с результатами эксперимента;
- д) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- е) вывод о роли нейтрального провода в трехфазной цепи при соединении потребителя по схеме звезда.

4. Контрольные вопросы

1. Какое соединение называется звездой?
2. Каково соотношение между фазным и линейным напряжениями трехфазного источника питания при соединении его обмоток по схеме звезда?
3. Какое соотношение между фазными и линейными токами при соединении в звезду?
4. Как определить величину тока в нейтральном проводе, если известны токи потребителя?
5. Для чего применяют нейтральный провод?
6. К каким зажимам следует подключить вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжение?
7. Какая трехфазная нагрузка называется симметричной?
8. Почему при несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода является аварийным режимом?

Работа № 2-5. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

1. Цель работы

Исследовать особенности работы трехфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Резистор 2 Вт 150 Ом	3
Тумблер	2

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

2.2. Включить источник питания (выключатель SA3). Установить на мультиметре режим измерения переменного напряжения и измерить мультиметром линейные напряжения источника питания на холостом ходу. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник питания. Вычислить среднее значение линейного напряжения U_L .

Таблица 1

$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_L, В$

2.3. В соответствии с рис. 1. собрать схему симметричной трехфазной цепи при соединении потребителей в треугольник. Предъявить схему для проверки.

2.4. Включить источник питания (выключатель SA3). Измерить фазные токи I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} и линейный ток I_A , а также напряжения на потребителях. Результаты занести в табл. 2.

2.5. Разомкнуть с помощью тумблера SA4 линейный провод фазы «В» и измерить фазные токи I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} и линейный ток I_A , а также напряжения на потребителях. Результаты занести в табл. 2.

2.6. Выключить с помощью тумблера SA5 нагрузку в фазе потребителя «СА» и провести измерения. Результаты занести в табл. 2.

2.7. Разомкнуть с помощью тумблера SA4 линейный провод фазы «В» и с помощью тумблера SA2 нагрузку в фазе потребителя «СА». Измерить фазные токи I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} и линейный ток I_A , а также напряжения на потребителях. Результаты занести в табл. 2.

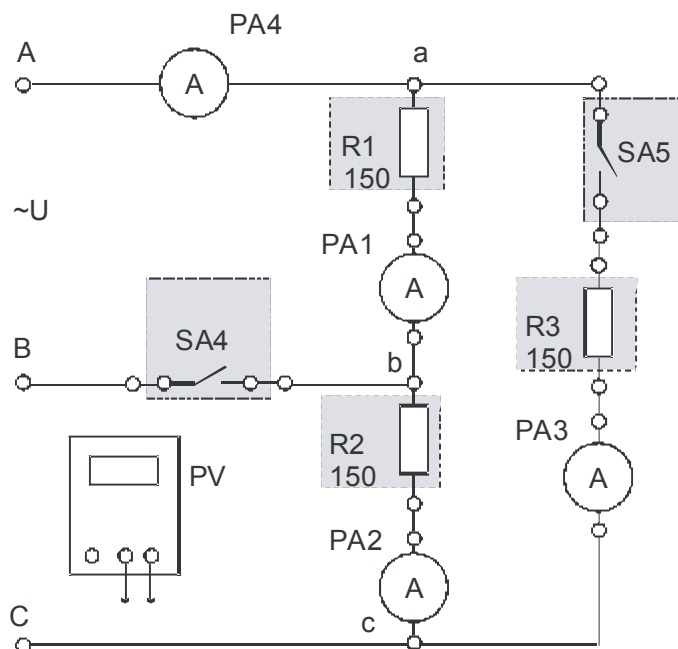


Рис. 1

Таблица 2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, мА						Напряжение на фазах потребителя, В		
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
Симметричная нагрузка									
Обрыв линейного провода «В»									
Обрыв фазы потребителя «СА»									
Обрыв фазы потребителя «СА» и обрыв линейного провода «В»									

2.8. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

2.9. По векторным диаграммам определить для исследованных режимов линейные токи I_B и I_C .

2.10. Сравнить результаты измерений линейных и фазных токов при соединении потребителя в треугольник для исследованных режимов.

2.11. Проанализировать влияние обрывов линейного и фазного проводов на режимы работы потребителей.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование работы и цель работы;
- технические данные электроизмерительных приборов;
- схему эксперимента с включенными измерительными приборами;
- таблицы с результатами эксперимента;
- векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?
2. Куда следует подключать вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжения трехфазного потребителя?
3. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
4. Какое соотношение между фазными и линейными токами симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
5. Всегда ли справедливы при соединении в треугольник соотношения
$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$
5. Всегда ли при соединении в треугольник справедливо соотношение
$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0?$$
7. Как отразится отключение одной фазы потребителя на режим работы других фаз и на режим работы всей трехфазной цепи, соединенной в треугольник?
8. Как повлияет обрыв линейного провода на режим работы потребителей при их соединении по схеме треугольник?

Работа № 2-6. НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Экспериментальное исследование вольтамперных характеристик катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Изучение формы кривой тока в катушке с сердечником. Сравнение экспериментальных результатов с расчетными результатами. Знакомство с работой двустороннего ограничителя уровня напряжения.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Резистор 2 Вт 22 Ом	1
Резистор 2 Вт 680 Ом	1
Катушка индуктивности	1
Батарея конденсаторов	1
Двуханодный стабилитрон	1

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле, минимодули резисторов и осциллограф).

2.2. Для снятия вольтамперной характеристики катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником собрать электрическую цепь по рис. 1. В качестве амперметра использовать цифровой прибор, в качестве вольтметра - мультиметр в соответствующем режиме работы. В качестве регулируемого источника синусоидального напряжения использовать функциональный генератор на частоте 50 Гц. Подключить параллельно добавочному резистору R1 выводы осциллографа. Представить схему для проверки преподавателю.

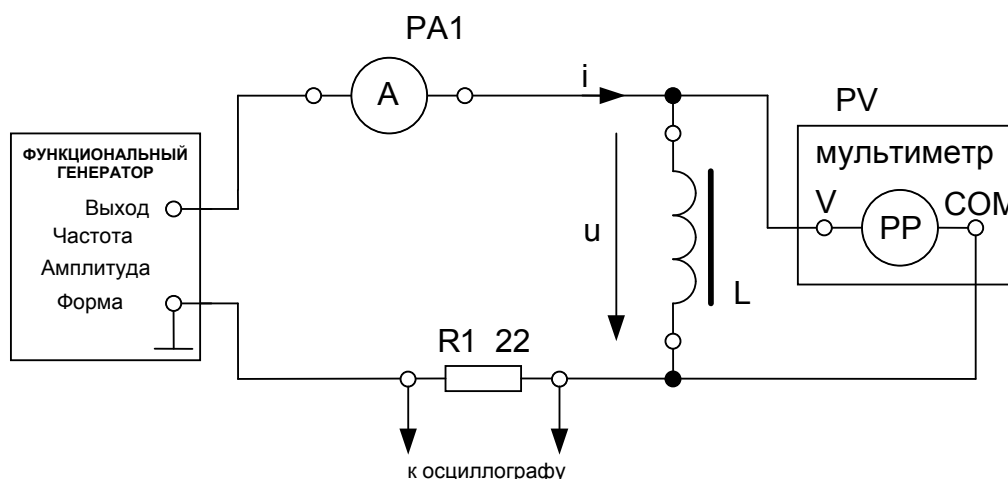


Рис.1

2.3. Снять вольтамперную характеристику $U_k = f(I_k)$ катушки индуктивности L. Установить ручку потенциометра **Um, В** в крайнее левое положение. Включить

источник питания (выключатель SA3) и функциональный генератор (SA1). Плавно увеличивая от нуля напряжение потенциометром **Um, В**, измерять напряжения на катушке U_K и ток I_K . Результаты измерений занести в табл. 1. При проведении измерений наблюдать с помощью осциллографа форму кривой тока в цепи. Зарисовать вид кривой тока. Выключить источник питания, функциональный генератор и мультиметр.

Таблица 1

$U_K, В$	0						
$I_K, А$							

2.4. Для снятия вольтамперной характеристики конденсатора подключить вместо катушки с сердечником батарею конденсаторов C (минимодуль батареи конденсаторов). Установить переключатель минимодуля батареи конденсаторов в заданную преподавателем позицию. Включить источник питания и снять вольтамперную характеристику конденсатора. Выполнять аналогично п. 2.3. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить источник питания и мультиметр.

Таблица 2

$U_C, В$	0						
$I_C, А$							

2.5. Используя полученные экспериментальные результаты, построить в одной системе координат вольтамперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Для случая последовательного соединения катушки с ферромагнитным сердечником и исследованного конденсатора построить вольтамперную характеристику такой цепи.

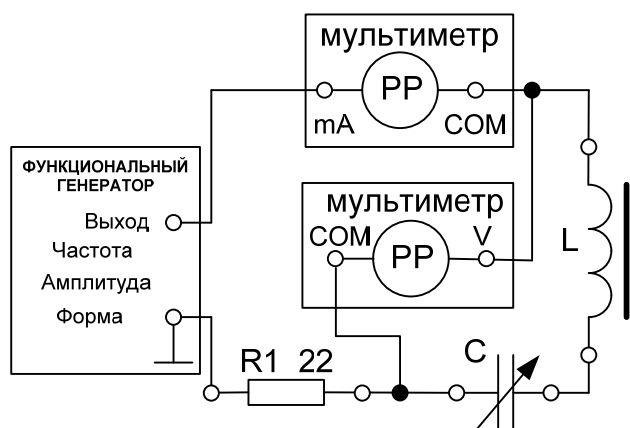


Рис. 2

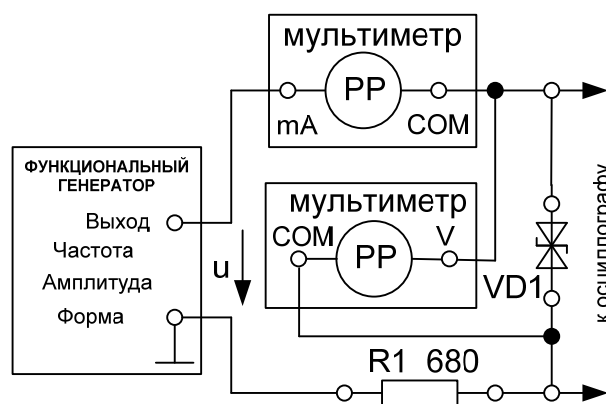


Рис. 3

2.6. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора (рис. 2).

После проверки схемы преподавателем включить электропитание. Плавно увеличивая потенциометром **Um, В** входное напряжение U от нуля, снять вольтамперную характеристику всей цепи. Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

$U, В$	0						
$I, А$							

2.7. По экспериментальным результатам построить ВАХ цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Сравнить полученную характеристику с расчетной характеристикой.

2.8. Ознакомиться с работой ограничителя уровня напряжения. Для этого собрать схему по рис. 3. Подключить параллельно двуханодному стабилитрону VD1 осциллограф.

Плавное увеличение от нуля напряжения потенциометром **Um**, **B** наблюдать по осциллографу форму выходного напряжения. Измерить осциллографом амплитуду напряжения на стабилитроне и мультиметром значение тока, при которых начинается ограничение амплитуды выходного напряжения и сравнить их с паспортными данными стабилитрона 2С162А. Зарисовать осциллограммы наибольшего входного и соответствующего выходного напряжений, измерить амплитуду выходного напряжения и величину тока через стабилитрон. Выключить источник питания, функциональный генератор и мультиметр.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- в) расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- г) осциллограммы напряжений и токов;
- д) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- е) выводы о свойствах исследованных цепей.

4. Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение ферромагнитного сердечника катушки индуктивности.
2. Пояснить влияние сердечника на величину индуктивности катушки.
3. Как изменится вольтамперная характеристика катушки индуктивности при наличии воздушного зазора в сердечнике?
4. Почему сердечник обычно выполняется из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали?
5. Объяснить причину искажения синусоидальной формы тока при питании катушки индуктивности синусоидальным напряжением.
6. Как определить параметры схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником?
7. Каким образом в цепи с последовательным соединением линейной катушки индуктивности и конденсатора можно обеспечить возникновение резонанса напряжений?
8. В чем особенности явления феррорезонанса напряжений?
9. Почему с увеличением емкости конденсатора возможно изменение величины питающего напряжения, при котором происходит триггерный эффект?
10. Каково практическое применение феррорезонансных явлений?
11. Объяснить причину изменения формы выходного напряжения ограничителя уровня напряжения.

Работа № 2-7. ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

1. Цель работы

Ознакомиться с назначением и основными характеристиками однофазного трансформатора, работой трансформатора при различном характере нагрузки.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Трансформатор	1
Резистор 2 Вт 22 Ом	1
Тумблер	3
Батарея конденсаторов	1
Потенциометр ППБ-3А-150	1

2. Порядок выполнения работы

Ознакомиться с лабораторной установкой (источник питания, функциональный генератор, измеритель мощности, мультиметр, цифровые амперметры РА1...РА4, наборное поле и минимодули резисторов).

Собрать электрическую цепь (рис. 1).

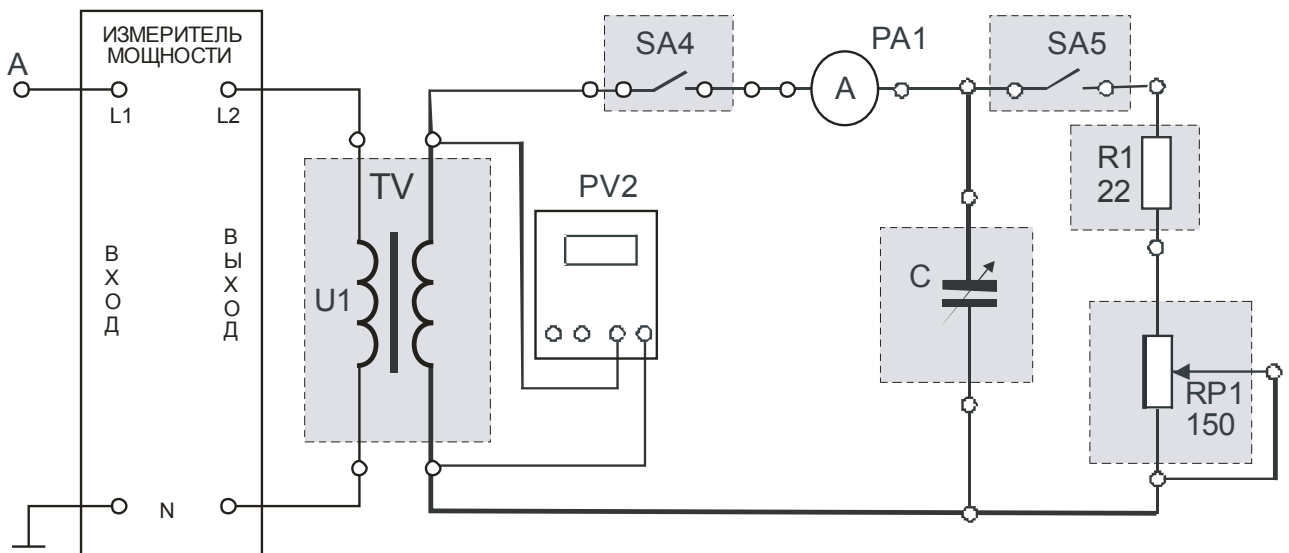


Рис. 1

В качестве первичного напряжения использовать напряжение трехфазного источника. В качестве вольтметра на вторичной стороне трансформатора использовать мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. В качестве емкостной нагрузки C использовать минимодуль батареи конденсаторов. **Установить переключатель батареи конденсаторов в позицию «0».** В качестве активной нагрузки использовать постоянный резистор $R=22$ Ом и потенциометр $RP1$ с сопротивлением 150 Ом, включенный по схеме переменного сопротивления. Предъявить схему для проверки преподавателю.

Включить источник питания, мультиметр и измеритель мощности. Измерить величину первичного U_{10} и вторичного U_{20} напряжения в режиме холостого хода трансформатора. Результаты измерений занести в табл. 1. По результатам измерений рассчитать коэффициент трансформации трансформатора K_{12} .

Таблица 1

$U_{10}, \text{В}$	$U_{20}, \text{В}$	K12

Исследовать трансформатор в рабочем режиме при активном характере нагрузки. Для этого замкнуть тумблеры SA4 и SA5 и, изменяя величину сопротивления нагрузки RP1, измерить величины, указанные в табл. 2. По результатам исследования вычислить активную мощность вторичной цепи и коэффициент полезного действия трансформатора η , построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$ при активном характере нагрузки, зависимость первичного тока от величины вторичного тока $I_1 = f(I_2)$, зависимости коэффициента полезного действия трансформатора и его коэффициента мощности от активной мощности вторичной цепи P_2 .

Таблица 2

Измерено						Вычислено	
Вторичная цепь			Первичная цепь			$P_2, \text{Вт}$	η
$I_2, \text{мА}$	$U_2, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{мА}$	$P_1, \text{Вт}$	$\cos \phi_1$		

Снять внешнюю характеристику трансформатора при емкостном характере нагрузки. Для этого разомкнуть тумблер SA5. Величину емкости батареи конденсаторов С изменять с помощью переключателя минимодуля батареи конденсаторов С. Результаты измерений занести в табл. 3. По результатам исследования построить внешнюю характеристику трансформатора при емкостной нагрузке, сравнить ее с характеристикой, полученной при активной нагрузке. Выключить электропитание стенда.

Таблица 3

$U_2, \text{В}$										
$I_2, \text{А}$										

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) схему экспериментов с включенными измерительными приборами;
- в) таблицы с результатами экспериментов;
- г) экспериментальные характеристики;
- д) вывод по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен трансформатор?
2. Каков принцип действия трансформатора?
3. Как опытным путем определить коэффициент трансформации?
4. Почему при увеличении тока нагрузки увеличивается ток, потребляемый трансформатором из сети?
5. Почему при изменении нагрузки изменяется КПД трансформатора?
6. Какие процессы характеризует активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания?
7. Почему при активной нагрузке увеличение тока ведет к уменьшению вторичного напряжения?
8. Почему внешняя характеристика трансформатора зависит от характера нагрузки?

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

Работа № 3-1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ

1. Цель работы

Изучение характеристик и параметров диодов – выпрямительных, Шоттки, стабилитронов и светодиодов.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Выпрямительный диод 1 А	1
Диод Шоттки 1 А	1
Стабилитрон 4,7 В	1
Светодиод 20 мА	1
Потенциометр 150 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 1,0 кОм	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «р-п переход», «Диоды» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

2.2. Экспериментальное исследование выпрямительного диода:

а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 1. Для измерения анодного тока включить цифровой амперметр в режиме постоянного тока. Для измерения анодного напряжения использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения. Последовательно с диодом включить токоограничивающий резистор $R = 150 \text{ Ом}$.

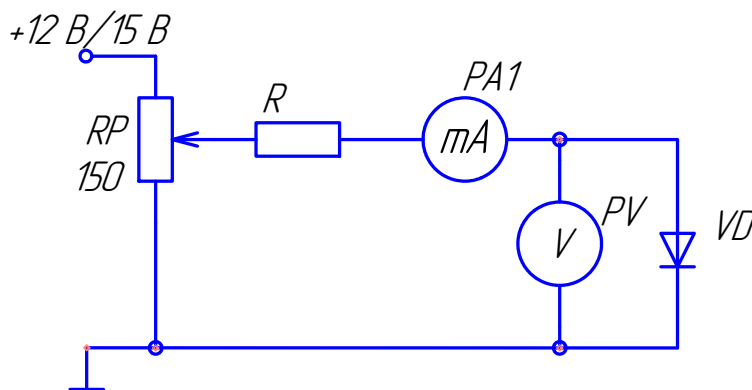


Рис. 1

Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе для прямой ветви (рис. 1); для снятия характеристик регулировать напряжение на

выходе потенциометра; результаты измерений занести в таблицу, по которой построить прямую ветвь ВАХ;

б) собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ VD (рис. 2); снять обратную ветвь ВАХ диода;

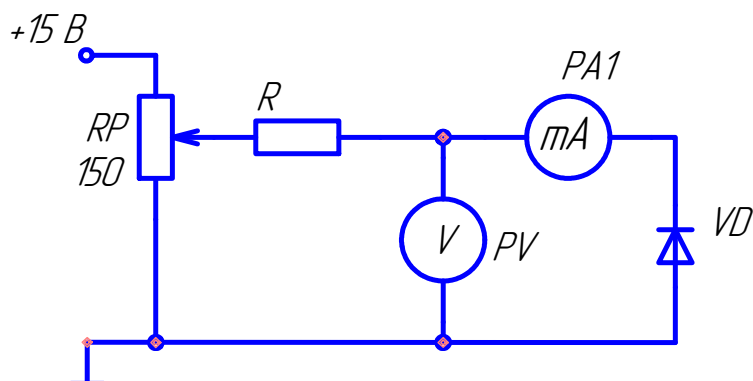


Рис. 2

в) определить параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии U_{am} при максимальном анодном токе $I_{a\max}$, пороговое напряжение U_0 и дифференциальное сопротивление r_d ;

г) собрать схему для получения ВАХ диода на экране осциллографа. Включить токоограничивающий резистор $R = 150$ Ом. Исследование выпрямительного диода выполняется на переменном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 3. Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$, а корпус осциллографа (\perp) соединить с общим проводом (\perp). Вход X (CH1) осциллографа подключить к аноду диода. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Подать питание. Зарисовать ВАХ диода, определить масштабы по току и напряжению;

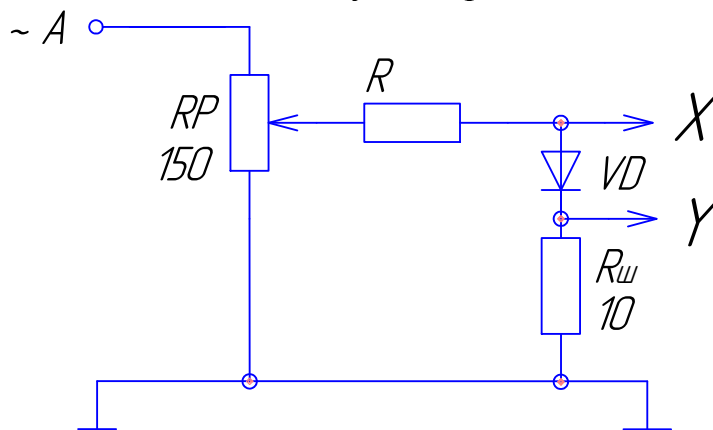


Рис. 3

д) определить по осциллограмме параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии U_{am} при максимальном анодном токе $I_{a\max}$, пороговое напряжение U_0 и дифференциальное сопротивление r_d , сравнить с результатами, полученными на постоянном токе;

2.3. Экспериментальное исследование диода Шоттки:

Выполнить пункты 2.2а, в для диода Шоттки, используя схему рис. 1. ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.2.2. Сравнить ВАХ и параметры диода

Шоттки с параметрами и ВАХ обычного выпрямительного диода.

2.4. Экспериментальное исследование стабилитрона:

выполнить пункты 2.2а, б, г для стабилитрона, включив в схему резистор $R = 150 \text{ Ом}$. ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.2.2. Сравнить ВАХ стабилитрона и ВАХ обычного выпрямительного диода. По ВАХ, снятым на постоянном и переменном токе, определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ и дифференциальное сопротивление $r_{дст}$ (на участке стабилизации), сравнить результаты.

2.5. Экспериментальное исследование светодиода:

собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ светодиода на постоянном токе (рис. 1), установив токоограничивающий резистор $R = 1 \text{ кОм}$; снять ВАХ и построить ее на том же рисунке, что и в п.2.2. Определить ток, при котором становится заметным свечение.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе; в выводах обязательно ответить на контрольные вопросы 11 – 13.

4. Контрольные вопросы

1. Каковы свойства p - n перехода?
2. Объясните вид ВАХ p - n перехода?
3. Как влияет температура на различные участки ВАХ диода?
4. Как снять по точкам ВАХ диода?
5. Почему на схемах рис. 1 и 2 по-разному включены измерительные приборы?
6. Как снять ВАХ диода с помощью осциллографа?
7. Какие погрешности можно ожидать при осциллографировании по схеме рис. 3?
8. Поясните вид ВАХ стабилитрона.
9. Где рабочий участок на ВАХ стабилитрона?
10. Как зависит напряжение стабилизации от температуры?
11. В чем отличие ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки и светодиода?
12. От чего зависит яркость свечения светодиода?
13. Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде?
14. Каким образом на экране осциллографа получают изображение функциональной зависимости двух напряжений?
15. Каким образом на экране осциллографа получается изображение периодической функции времени?

Работа № 3-2. ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

1. Цель работы

Изучение характеристик и параметров биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Транзистор n-p-n 1 А	1
Потенциометр 10 кОм	1
Потенциометр 150 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 22 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 330 Ом	1
Резистор 10 кОм	1
Диод 1 А	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса “Транзисторы” и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

2.2. Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора:

а) собрать схему для снятия характеристик прямой передачи по току биполярного транзистора (рис. 1). Для измерения тока базы включить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения параллельно R_1 , а для измерения тока коллектора – цифровой амперметр $PA1$. Для измерения напряжения на коллекторе использовать стрелочный вольтметр; в качестве резистора R_k использовать модули $R = 150$ или $R = 330$ Ом (по указанию преподавателя);

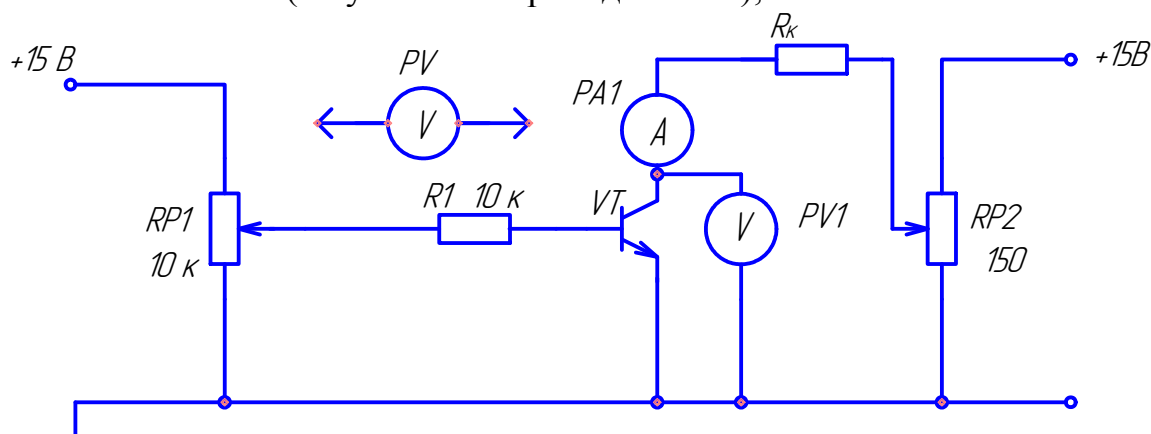


Рис. 1

б) снять статическую характеристику прямой передачи по току $I_k = f(I_b)$ при U_k , равном заданному значению E_k и $R_k = 0$. Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на график. При снятии характеристики следить за

постоянством напряжения U_k ;

в) снять характеристику прямой передачи по току при наличии заданного сопротивления нагрузки R_k (рис. 1). С помощью потенциометра RP1 установите ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра RP2 установите заданное значение E_k . В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще;

г) по построенной в п. 2в характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток $I_{б\max}$, при котором еще обеспечивается линейное усиление;

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа. Собрать схему в соответствии с рис. 2. Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$, а корпус осциллографа (\perp) соединить с общим проводом (\perp). Вход X (CH1) осциллографа подключить к коллектору. При этом переключатель должен быть приведен в положение X/Y. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение. Включить источник питания. Изменять ток базы от 0 до максимума (но не более 1 мА), пронаблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений тока базы: $I_{б1} = 0$; $I_{б2} = 0,5 I_{б\max}$; $I_{б3} = I_{б\max}$. Записать масштабы по напряжению и току. Выключить источник питания.

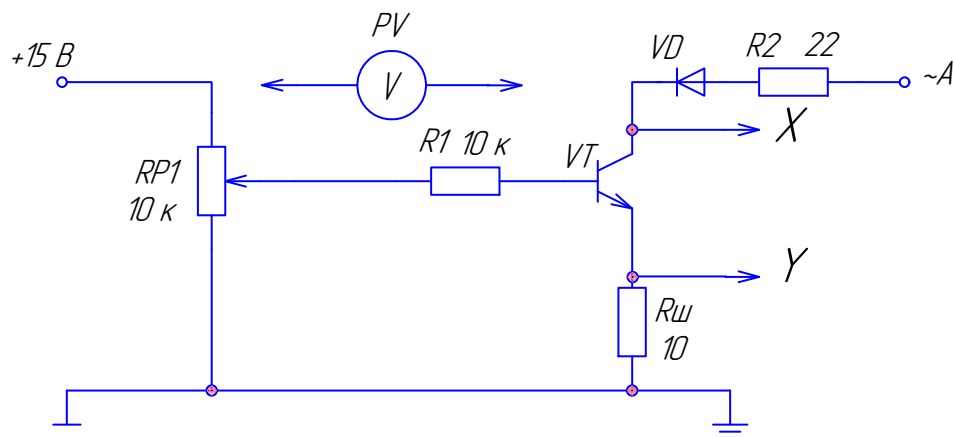


Рис. 2

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; определить по экспериментальным характеристикам прямой передачи по току статический коэффициент передачи тока β и коэффициент усиления каскада по току K_i при заданной нагрузке вблизи рабочей точки покоя для класса А:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}, \quad K_i = \frac{\Delta I'_k}{\Delta I_b};$$

- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ($P_{кр}$

$=U_{кр} I_{кр}$), в режиме насыщения $P_{кн}$, отсечки $P_{ко}$ и средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ($P_{кр.ср} = 0,5P_{кн} + 0,5P_{ко}$), воспользовавшись экспериментально снятыми выходными характеристиками. Сравнить потери в классе А и в ключевом режиме. Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены;

4. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия транзистора?
2. Какие существуют схемы включения транзисторов?
3. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору типа *n-p-n* при различных схемах включения?
4. Как выглядят выходные и входные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
5. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
6. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току β ?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Как построить линию нагрузки?
9. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
10. Что такое ключевой режим?
11. Каковы преимущества ключевого режима?

Работа № 3-3. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

1. Цель работы

Изучение характеристик, параметров и режимов работы усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Транзистор n-p-n 1 А	1
Потенциометр 10 кОм	1
Потенциометр 150 Ом	1
Конденсатор 22 мкФ	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 1 кОм	1
Резистор 1,5 кОм	1
Резистор 10 кОм	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

- а) изучить темы курса «Транзисторы», «Усилительные каскады» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;
- б) пользуясь принципиальной схемой, приведенной в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

2.2. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе в классе А:

а) собрать схему для исследования усилительного каскада в соответствии с рис. 1. Подключить канал СН1 осциллографа ко входу усилителя, а канал СН2 к выходу усилителя. Включить временную развертку осциллографа. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал частотой 50 Гц, уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды. Переключить входы СН1 осциллографа на положение «вход закорочен». Включить питание стенда. При токе $I_6 = 0$ установить с помощью потенциометра RP2 заданное значение E_k и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра RP2!);

б) определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{\text{вых м}}$. Для этого при токе базы, равном нулю, проверьте положение линии на экране осциллографа. При закороченном входе осциллографа она должна совпадать с нулевой линией, а при разомкнутом – отклоняться примерно на три четверти от половины экрана. Нулевую линию можно сместить вниз для увеличения масштаба, но обязательно отметить ее положение. Плавно увеличивайте амплитуду входного сигнала и постоянную составляющую тока базы до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратите внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости уточните

положение рабочей точки покоя. Зарисуйте на кальке выходное напряжение с искажениями и предельное без искажения. При зарисовке осциллограмм не забудьте нанести положение нулевой линии. Определите масштабы по напряжению и по времени. Дальнейшие измерения выходного сигнала необходимо производить в том же масштабе;

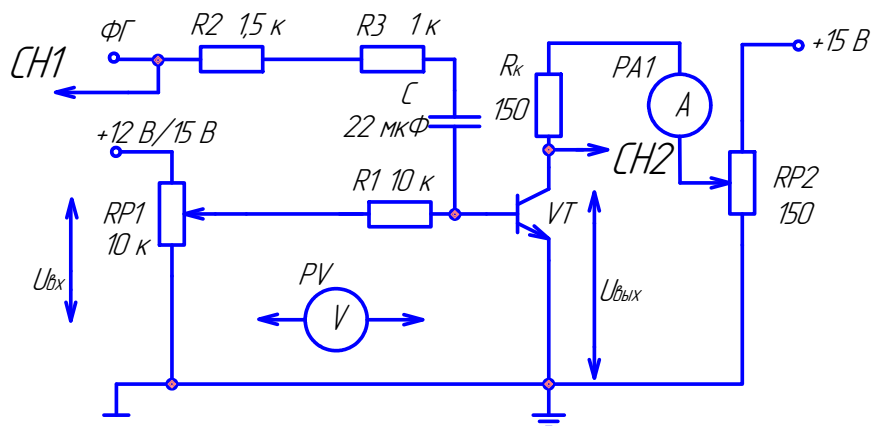


Рис 1

в) определить положение рабочей точки покоя. Для этого уменьшить входной синусоидальный сигнал до нуля и определить величины токов $I_{бр}$, $I_{кр}$; по осциллографу определить $U_{кр}$;

г) исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Для этого установите вновь рабочую точку $I_{бр}$, $I_{кр}$, $U_{кр}$ и максимальную амплитуду синусоидального неискаженного выходного напряжения. Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей тока базы $I'_{бр} = 0,5 I_{бр}$ и $I''_{бр} = 1,5 I_{бр}$, при этом переменный входной сигнал изменять не следует;

д) определить коэффициент усиления каскада по напряжению K_u . Для этого установить $I_б = I_{бр}$, вход СН1 осциллографа, переключить на закрытый вход (АС). Изменяя переменный входной сигнал, добиться синусоидального по форме максимального выходного сигнала. Измерить с помощью осциллографа амплитуды выходного $U_{вых}$ и входного $U_{вх}$ сигналов. Определить коэффициент усиления, учесть масштабы;

2.3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе в классе В:

а) определить амплитуду выходного напряжения (полуволны) в классе В. Для этого с помощью потенциометра RP1 установить $I_б = 0$, и регулируя амплитуду входного сигнала добиться максимальной неуплощенной полуволны синусоиды выходного напряжения; зарисовать и обработать осциллограмму;

б) если длительность полуволны меньше полупериода, повысьте потенциометром RP1 постоянный ток $I_б$ и изменяя переменный входной сигнал добейтесь воспроизведения усилителем ровно половины периода неискаженного синусоидального напряжения с максимальной амплитудой. Уменьшите $U_{вх}$ до нуля и запишите ток $I_б$, который пришлось установить в рабочей точке покоя, чтобы не было искажений. Эта рабочая точка покоя соответствует классу АВ.

2.4. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе в классе D:

а) исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите $I_b = 0$ и увеличить сигнал от функционального генератора ФГ до перехода транзистора в ключевой режим; зарисуйте и обработайте осциллограмму выходного напряжения;

б) повторите опыт при подаче на вход прямоугольного сигнала.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) обработанные осциллограммы;
- д) рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ($P_{кр} = U_{кр} I_{кр}$), в режиме насыщения $P_{кн}$, отсечки $P_{ко}$ (если ток $I_{ко}$ очень мал, принять $P_{ко} = 0$) и средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ($P_{кр.ср} = 0,5P_{кн} + 0,5P_{ко}$), воспользовавшись экспериментально снятыми осциллограммами. Сравнить потери в классе А и в ключевом режиме. Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены;

4. Контрольные вопросы

1. Как построить линию нагрузки?
2. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, АВ, В, D?
3. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером.
4. Каково назначение элементов усилителя?
5. Как определить коэффициент усиления каскада по току и напряжению (графически и экспериментально)?
6. Что такое ключевой режим?
7. Каковы преимущества ключевого режима?

Работа № 3-4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ

1. Цель работы

Изучение работы усилительного каскада на биполярном транзисторе в ключевом режиме при различных видах нагрузки.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Транзистор n-p-n 1 А	1
Диод 1 А	1
Дроссель 200 мГн	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 1,5 кОм	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Ключевой режим транзистора» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальной схемой, приведенной в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

2.2. Экспериментальное исследование биполярного транзисторе в ключевом режиме при активной нагрузке:

а) собрать схему для исследования в соответствии с рис. 1. Подключить канал CH2 осциллографа ко входу усилительного каскада, а канал CH1 к выходу. Включить временную развертку осциллографа. Включить функциональный генератор и установить прямоугольный сигнал частотой 40 кГц. Включить питание стенда. Увеличивая сигнал регулятором амплитуды наблюдать изменение сигнала на выходе каскада; зарисовать осциллограммы напряжений на входе и на выходе;

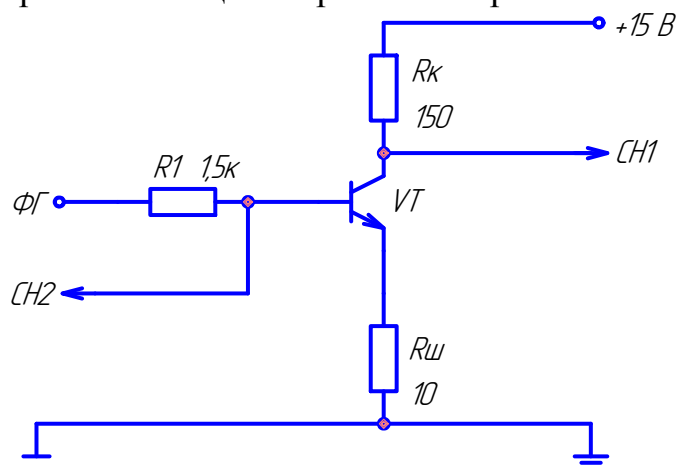


Рис. 1

б) в соответствии с рис.2. переключить канал CH2 осциллографа на шунт; зарисовать осциллограммы напряжения на коллекторе u_k и тока коллектора i_k (тока эмиттера); при зарисовке осциллограмм не забудьте нанести положение нулевой линии. Определите масштабы по напряжению, току и времени. Дальнейшие

измерения сигналов необходимо производить в том же масштабе;

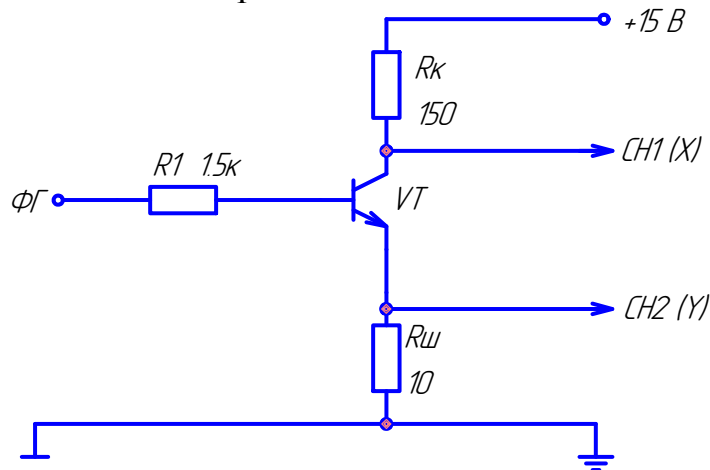


Рис. 2

в) снять с помощью осциллографа траекторию движения рабочей точки в ключевом режиме при активной нагрузке. Для этого переключатель осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Не забудьте при осциллографировании нанести оси координат; выключить питание модуля.

2.3. Экспериментальное исследование биполярного транзисторе в ключевом режиме при активно-индуктивной нагрузке, шунтированной диодом:

а) собрать схему для исследования в соответствии с рис. 3. **Чтобы не вывести из строя транзистор, обратите особое внимание на правильность включения диода.** Подключить канал CH2 осциллографа ко входу усилительного каскада, а канал CH1 к выходу. Включить временную развертку осциллографа. Включить функциональный генератор и установить прямоугольный сигнал частотой 40 кГц при минимальном значении амплитуды. Включить источник питания. Увеличивая сигнал регулятором амплитуды наблюдать изменение сигнала на выходе каскада; зарисовать осциллограммы напряжений на входе и на выходе;

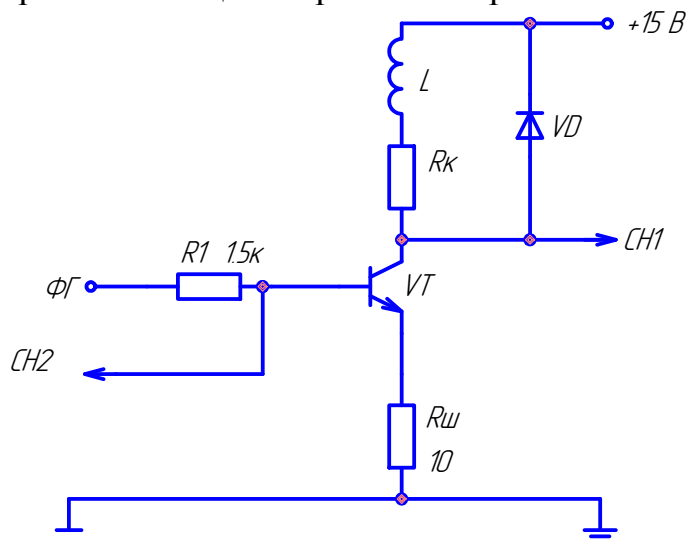


Рис 3.

б) в соответствии с рис 4. переключить канал CH2 осциллографа на шунт; зарисовать осциллограммы напряжения на коллекторе u_k и тока коллектора i_k (тока эмиттера); при зарисовке осциллограмм не забудьте нанести положение нулевой линии. Определите масштабы по напряжению, току и времени. Дальнейшие измерения сигналов необходимо производить в том же масштабе;

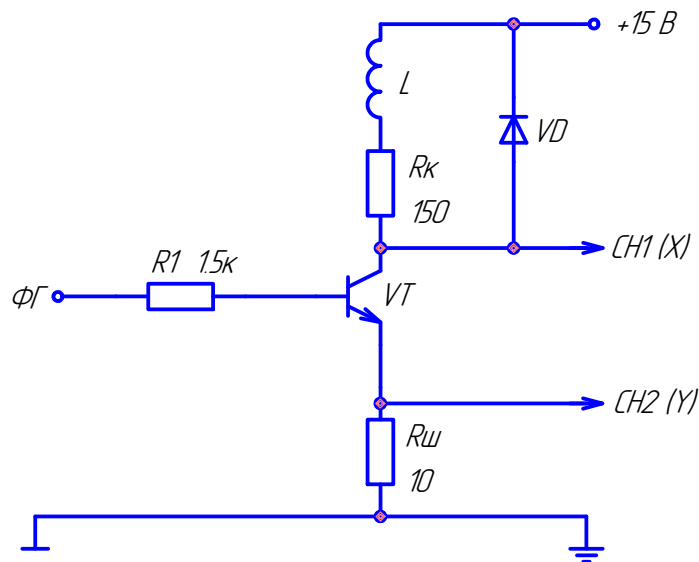


Рис. 4

в) снять с помощью осциллографа траекторию движения рабочей точки в ключевом режиме при активно-индуктивной нагрузке, шунтированной диодом. Для этого переключатель осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Не забудьте при осциллографировании нанести оси координат. Выключить источник питания и функциональный генератор.

3. Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) обработанные осциллограммы; сравнить осциллограммы при различных видах нагрузки;
- д) рассчитать потери в транзисторе в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ($P_{кр.ср} = 0,5P_{кн} + 0,5P_{ко}$), воспользовавшись экспериментально снятыми осциллограммами. Мощность определять перемножая ординаты осциллограмм i_k и u_k , и определив площадь под кривой мгновенной мощности p_k . Определить среднюю мощность за период. Сравнить потери при различных видах нагрузки.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое ключевой режим?
2. Каковы преимущества ключевого режима?
3. Как влияет вид нагрузки на траекторию рабочей точки?
4. Как влияет вид нагрузки на потери?
5. Для чего включается диод, шунтирующий нагрузку?

Работа № 3-5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

1. Цель работы

Ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением полевого транзистора.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Транзистор полевой MOSFET с каналом n-типа	1
Потенциометр 2,2 кОм	1
Потенциометр 150 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 100 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 330 Ом	1
Резистор 1,5 кОм	1

2. Краткие теоретические сведения

Полевой транзистор представляет собой полупроводниковый управляемый прибор, ток в котором обусловлен дрейфом носителей одного знака под действием продольного электрического тока. Управление величиной проводимости, следовательно, и тока осуществляется поперечным полем. Это электрическое поле создается напряжением, приложенным к управляющему электроду - затвору.

В работе исследуется полевой МОП-транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом *n*-типа (MOSFET), параметры которого приведены в табл. 1. Структура такого транзистора показана на рис. 1, а условное графическое обозначение на принципиальных электрических схемах – на рис. 2.

Таблица 1

Тип транзистора	BS170
Максимально допустимый ток стока $I_{C\max}$, мА	500
Максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{СИ\max}$, В	60
Максимальная рассеиваемая мощность $P_{C\max}$ при $t=25^{\circ}\text{C}$, Вт	0,83
Максимальное напряжение затвор-исток $U_{ЗИ\max}$, В	20
Максимальное значение статического сопротивления сток-исток в открытом состоянии, $R_{СИ\text{отк.}}$, Ом ($U_{ЗИ}=10\text{ В}$, $I_C=200\text{ мА}$)	5
Напряжение отпирания транзистора $U_{зи\text{пор}}$, В ($U_{СИ}=U_{ЗИ}$, $I_C=1\text{ мА}$)	0,8...2,0...3,0

В полевых транзисторах с изолированным затвором электрод затвора изолирован от полупроводниковой области канала слоем диэлектрика. Если в качестве диэлектрика используются окислы, например, SiO_2 , то транзистор имеет структуру металл-окисел-полупроводник или МОП-структуру. Принцип действия таких транзисторов основан на эффекте изменения проводимости поверхностного слоя полупроводника под действием поперечного электрического поля. Полевые транзисторы – твердотельные аналоги электронных ламп. Они характеризуются аналогичной системой параметров – крутизной характеристики (0,1...400 мА/В), напряжением отсечки (0,5...20 В), входным сопротивлением по постоянному току ($10^{11} \dots 10^{16}$ Ом) и т.д.

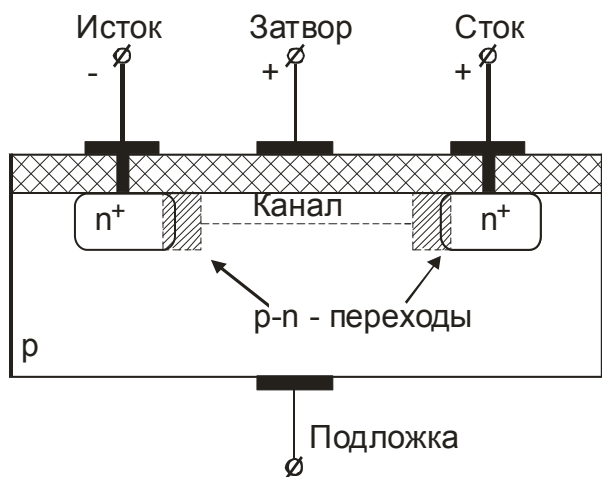


Рис. 1

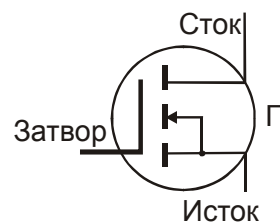


Рис. 2

При нулевом напряжении $U_{зи} = 0$ канал между истоком и стоком отсутствует. Pn -переходы, направленные встречно, препятствуют движению электронов от истока к стоку, то есть канал отсутствует. При $U_{зи} > 0$ возникающее под затвором электрическое поле будет отталкивать положительные заряды (дырки, являющимися основными носителями в p -полупроводнике) вглубь полупроводника. При некотором пороговом значении напряжения между стоком и истоком под затвором накапливается достаточный слой электронов. Создается (индуцируется) проводящий канал, толщина которого может составить 1...2 нанометра, которая далее практически не меняется. Удельная проводимость канального слоя зависит от концентрации электронов в нем. Изменяя $U_{зи}$, можно менять величину тока стока. Примерный вид стоковых (выходных) вольтамперных характеристик $I_c = f(U_{си})$ при постоянных значениях $U_{зи} = const$ и сток-затворной (передаточной) вольтамперной характеристики $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$ транзистора с индуцированным каналом показаны на рис. 3а и рис. 3б. Особенностью характеристик является то, что ток возникает при положительных напряжениях $U_{зи} > U_{зи\text{ пор}}$, где $U_{зи\text{ пор}}$ — напряжение отпирания транзистора. Как видно из рис. 3, все характеристики располагаются при положительных значениях напряжений.

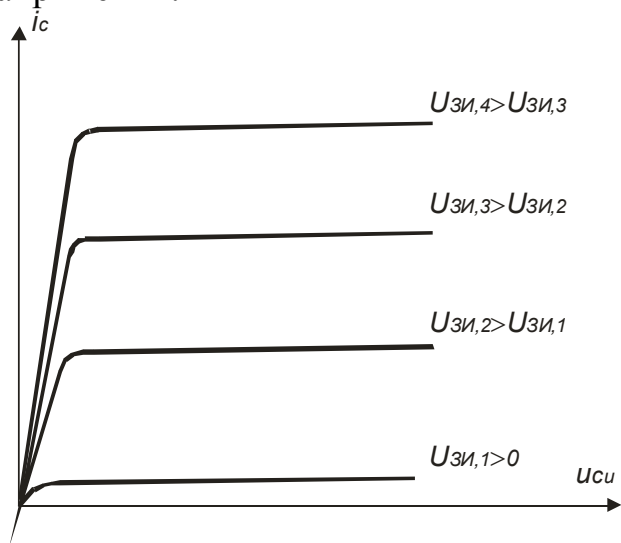


Рис.3а

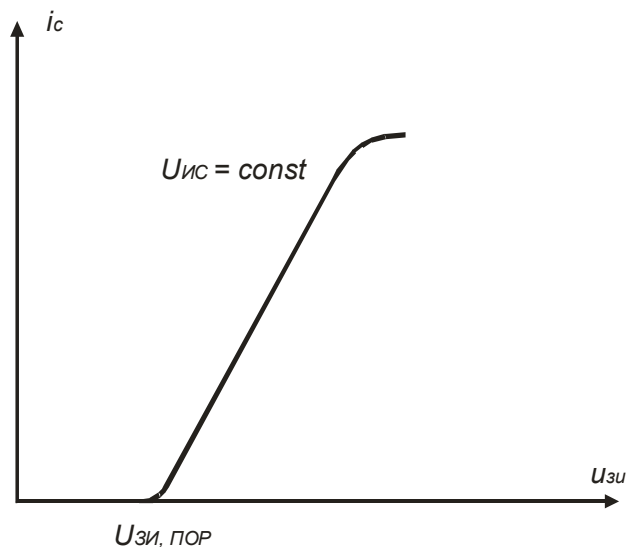


Рис.3б

К основным параметрам полевых транзисторов с изолированным затвором относят:

- дифференциальное сопротивление стока на участке насыщения R_c ;
- допустимый ток стока I_{Cmax} ;
- допустимое напряжение U_{Cmax} ;
- допустимая мощность P_{Cmax} .

К неоспоримым достоинствам таких транзисторов отнести:

- минимальную мощность управления и большой коэффициент усиления по току;
- большую скорость переключения;
- возможность простого параллельного включения транзисторов для увеличения выходной мощности;
- устойчивость транзисторов к большим импульсам напряжения;
- возможность применения современных технологий позволяет создавать интегральные микросхемы небольших размеров с малой потребляемой мощностью и содержащие до 10^6 активных элементов.

В отличие от биполярного транзистора, в полевом транзисторе ток управляющего электрода – затвора на низких частотах значительно меньше, чем ток базы биполярного транзистора.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать схему для снятия сток-затворной и стоковой характеристик полевого транзистора без нагрузки (рис. 4). В качестве вольтметра PV2 использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В, а в качестве PV1 – стрелочный прибор постоянного тока на 15 В. Для измерения тока использовать цифровой амперметр в режиме измерения постоянного тока (тумблер «=I/~I» установить в положение «=I»). Предъявить схему для проверки преподавателю.

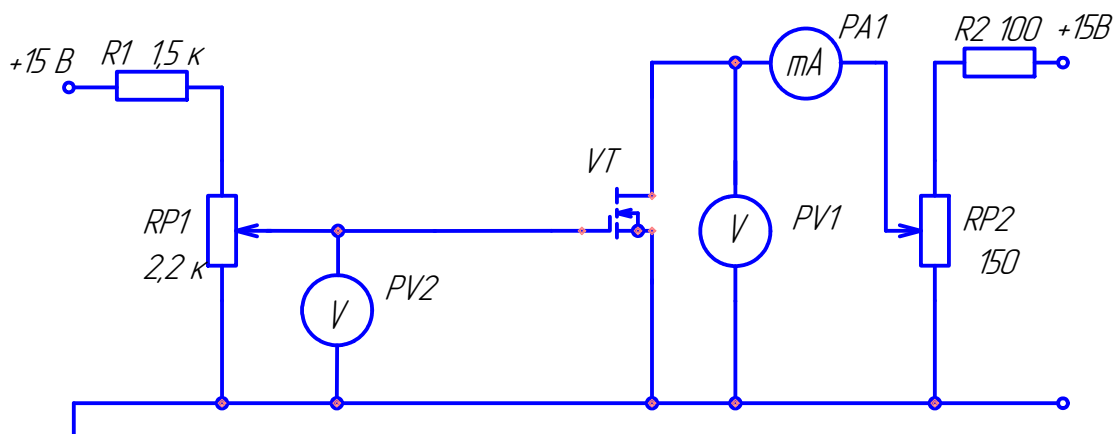


Рис. 4

3.2.1. Снять сток-затворную характеристику транзистора $I_C=f(U_{ЗИ})$ при заданном постоянном значении $U_{СИ} = const$ и $R_C=0$. Включить тумблер SA3 источника питания. С помощью потенциометра RP2 установите заданное значение $U_{СИ}$. Изменяя напряжение $U_{ЗИ}$ (начиная с «0») снять характеристику, не забывая

поддерживать заданное $U_{СИ}$. Экспериментальные результаты записать в табл. 2. Выключить тумблер «Питание». Построить полученную экспериментальную характеристику.

$U_{СИ}=$

Таблица 2

$U_{ЗИ}, В$	0						
$I_C, мА$							

3.2.2. Снять семейство стоковых характеристик транзистора $I_C=f(U_{СИ})$ при заданных постоянных значениях $U_{ЗИ}=const$. Включить питание модуля. Изменяя напряжение $U_{СИ}$ (начиная с «0») снять характеристику. Экспериментальные результаты записать в табл. 3. Выключить питание модуля. Построить полученные экспериментальные характеристики.

$U_{ЗИ}=$

Таблица 3

$U_{СИ}, В$							
$I_C, мА$							

3.

Собрать схему для снятия сток-затворной характеристики полевого транзистора с нагрузкой (рис. 5). В качестве вольтметра PV2 использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В, а в качестве PV1 – стрелочный прибор постоянного тока на 15 В. Для измерения тока использовать цифровой амперметр в режиме измерения постоянного тока. Предъявить схему для проверки преподавателю.

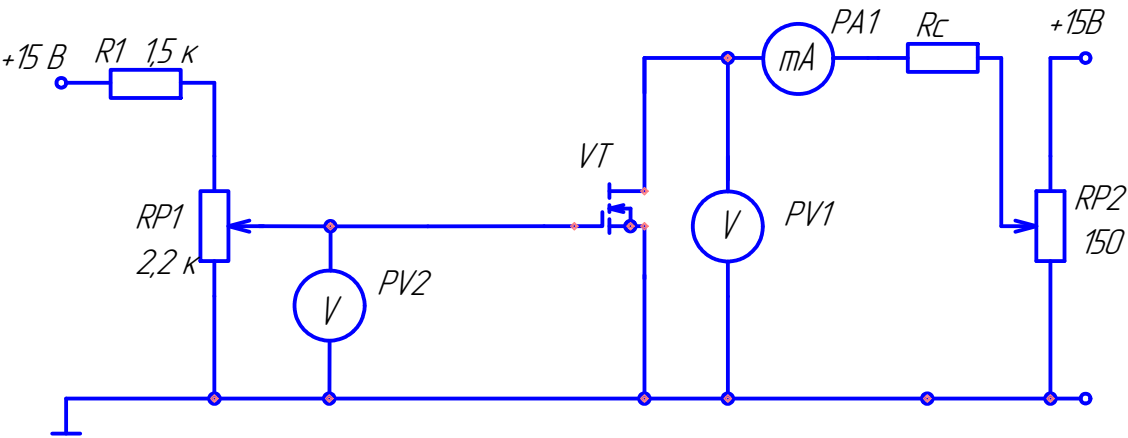


Рис. 5

3.3.1. Снять сток-затворную характеристику транзистора $I_C=f(U_{ЗИ})$ при заданном постоянном значении питания $E=const$ при наличии нагрузки R_C . С помощью потенциометра RP2 установите заданное значение источника питания E. В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. Изменяя напряжение $U_{ЗИ}$ (начиная с «0»), снять характеристику. В области вблизи насыщения ($U_{СИ}$ до 1 В) точки снимать чаще. Экспериментальные результаты записать в табл. 4. Выключить тумблер «Питание». Построить полученную экспериментальную характеристику.

$E=$

Таблица 4

$U_{ЗИ}, В$	0						
$I_C, мА$							

3.4. По полученным экспериментальным характеристикам определить крутизну передаточной (сток-затворной) характеристики $S = (dI_c/dU_3)$ при отсутствии и наличии нагрузки и дифференциальное сопротивление транзистора на участке насыщения $R_c = dU_c/dI_c$ при $U_3 = \text{const}$.

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы проведенных экспериментов;
- в) таблицы с результатами эксперимента и осциллограммы;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) осциллограммы;
- е) выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Какие разновидности полевых транзисторов вы знаете?
2. Каковы основные преимущества и недостатки полевых транзисторов?
3. Какие существуют схемы включения полевых транзисторов?
4. Почему ток транзистора достигает насыщения при изменении напряжения на стоке?
5. Какова полярность напряжений, прикладываемых к полевому транзистору с изолированным затвором и каналами «п» и «р» типов при схеме включения с общим истоком?
6. Как выглядят стоковые вольтамперных характеристик и сток-затворные вольтамперные характеристики транзистора с индуцированным и встроенным каналом?
7. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим истоком. Каково назначение элементов усилителя?

Работа № 3-6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ

1. Цель работы

Изучение характеристик и параметров тиристоров.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Тиристор 1 А	1
Потенциометр 2,2 кОм	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 10 кОм	1

2. Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Тиристоры» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь мнемосхемой начертить схемы для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

2. Экспериментальное исследование тиристора:

а) собрать схему для исследования тиристора на постоянном токе в соответствии с рис. 1. Для измерения тока управления I_y включить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения параллельно R_1 , для измерения анодного тока I_a включить цифровой амперметр PA1. Для измерения анодного напряжения U_a использовать стрелочный вольтметр постоянного напряжения, а для измерения напряжения управления U_y - мультиметр.

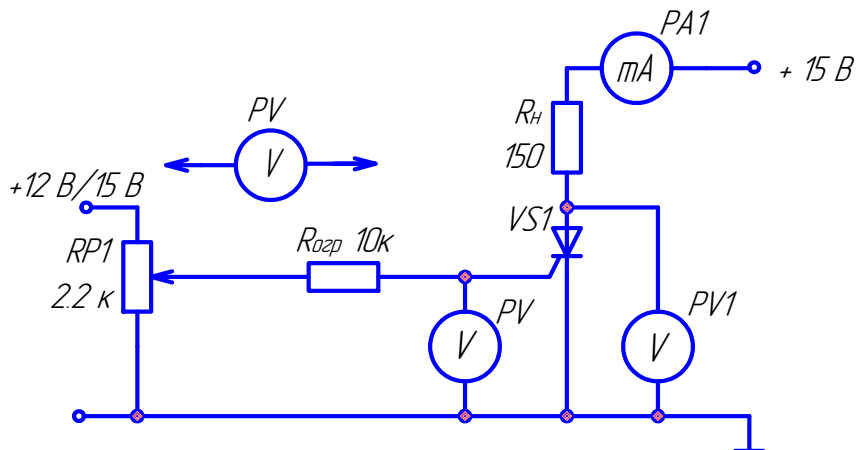


Рис. 1

б) определить отпирающий постоянный ток управления I_{yo} и отпирающее постоянное напряжение управления U_{yo} , при которых происходит включение тиристора. Для этого плавно вращать ручку потенциометра $RP1$, увеличивая ток управления I_y , зафиксировать, при каком значении тока управления I_{yo} и напряжения управления U_{yo} включится тиристор. О включении тиристора судить по резкому уменьшению напряжения на аноде U_a и увеличению анодного тока I_a ;

в) исследовать возможность выключения тиристора по цепи управления и по анодной цепи. Для этого, включив тиристор, уменьшать до нуля ток управления I_y . Выключить тиристор, разорвав цепь анода. Наблюдая за изменением анодного тока

I_a и напряжения U_a , сделать вывод об управляемости тиристора, сформулировав условия включения и выключения тиристора. Выключить источник питания;

г) снять и построить входную характеристику тиристора $U_y = f(I_y)$ (при разорванной анодной цепи), нанести на нее точку, соответствующую току I_{yo} ;

д) собрать схему для исследования тиристора на переменном токе для получения анодной ВАХ тиристора на экране осциллографа (рис. 2). Подключить к схеме общие точки « \perp » источников постоянного и переменного напряжений. Подать на вход CH2 (Y) осциллографа напряжение с шунта $R_{ш}$, пропорциональное току в анодной цепи i_a , а на вход CH1 (X) – анодное напряжение тиристора u_a (при этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y). Корпус осциллографа (\perp) присоединить к общему проводу (\perp). Зарисовать ВАХ тиристора при двух значениях тока управления I_y , определить масштабы по току и напряжению. Выключить источник питания;

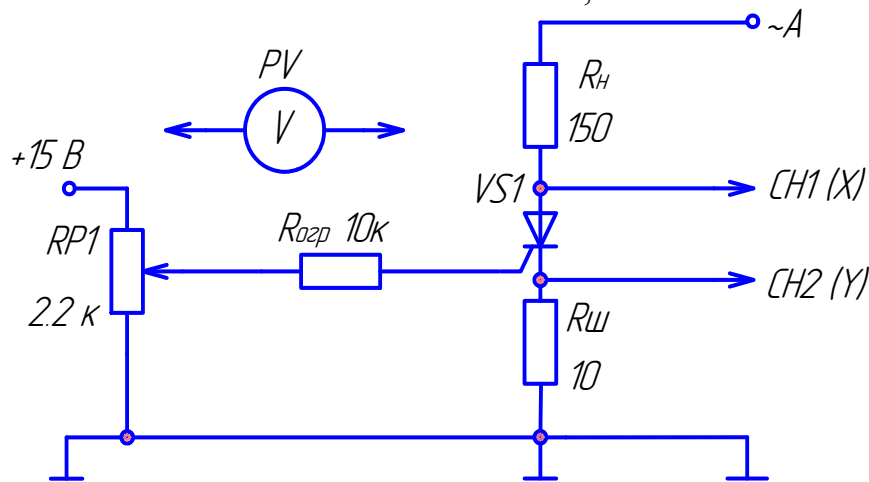


Рис. 2

е) определить по осциллограммам максимальное напряжение между анодом и катодом U_{FM} в открытом состоянии при максимальном анодном токе $I_{a.max}$, ток удержания I_{yd} , пороговое напряжение $U_{T(TO)}$ и дифференциальное сопротивление r_T .

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Поясните вид выходной (анодной) ВАХ тиристора.
2. Поясните вид входной ВАХ тиристора.
3. Как определить пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии?
4. Как снять выходную ВАХ тиристора?
5. Сравните свойства тиристорov и транзисторов по управляемости.
6. Объясните назначение диаграммы управления тиристора.

Работа № 3-7. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО И НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

1. Цель работы

Изучение схем включения операционного усилителя с обратными связями в качестве инвертирующего и неинвертирующего усилителя.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
ОУ	1
Потенциометр 2,2 кОм	1
Резистор 10 кОм	3
Резистор с переключателем 10 – 470 кОм	1

Таблица переключений

Таблица 1

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сопротивление	10к	20к	30к	52к	74к	96к	152к	208к	264к	364к	470к

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса "Характеристики и параметры усилителей", "Обратные связи в усилителях", "Аналоговые интегральные схемы", "Схемы включения операционного усилителя"; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) для инвертирующего усилителя нарисовать в масштабе временные диаграммы $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$ при заданных преподавателем значениях входного синусоидального напряжения и резисторов. Коэффициент усиления инвертирующего усилителя по напряжению

$$K_u = -\frac{R_3}{R_1};$$

г) для неинвертирующего усилителя нарисовать в масштабе временные диаграммы $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$ при заданных преподавателем значениях входного синусоидального напряжения и резисторов. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по напряжению

$$K_u = 1 + \frac{R_3}{R_1};$$

2.2. Экспериментальное исследование инвертирующего усилителя.

а) собрать схему согласно рис. 1; в качестве R_3 включить минимодуль резистор с переключением 10...470 кОм; установить заданное преподавателем значение R_3 ; в качестве вольтметров использовать стрелочный прибор и мультиметр;

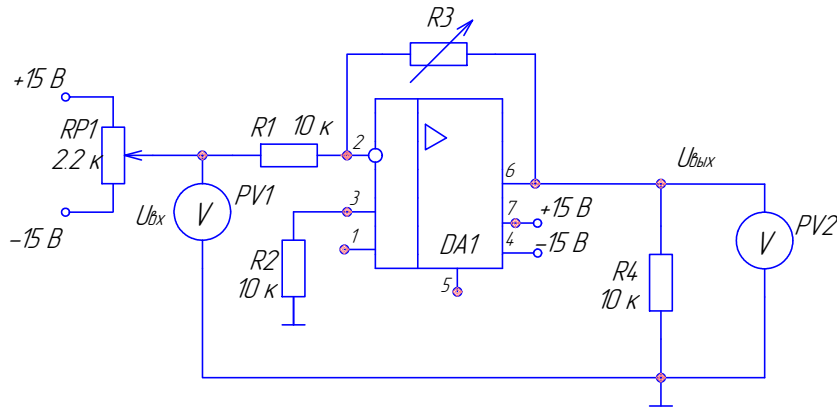


Рис. 1

б) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе $U_{вых} = F(U_{вх})$. В качестве источника сигнала использовать напряжение, регулируемое потенциометром RP1.

По амплитудной характеристике определить коэффициент усиления по напряжению K_{uoc} ; выключить питание;

в) снять амплитудные характеристики усилителя при помощи осциллографа для двух значений R_{oc} ($R3$). Для опыта необходимо подключить к модулю функциональный генератор (рис. 2). Для снятия зависимости одной величины от другой надо использовать два входа осциллографа X и Y. Вход Y (один вывод) подключается к выходу усилителя, вход X – к входу усилителя, а корпус (\perp) общему проводу (\perp). Развертка луча переключается в положение X/Y. Установить на выходе функционального генератора напряжение частотой порядка 100...200 Гц; определить по характеристикам коэффициенты усиления;

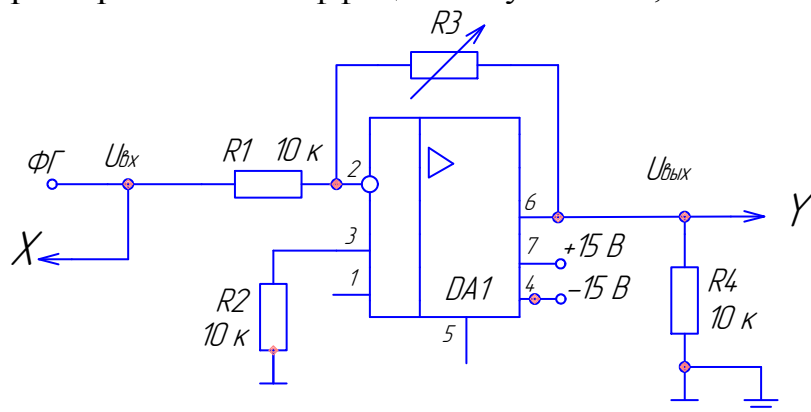


Рис. 2

г) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя $K_u = F(f)$ при $u_{вх} = \text{const}$ для максимального значения R_{oc} ($R3$). Переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Выходной сигнал усилителя должен находиться на линейном участке амплитудной характеристики. Амплитуды сигналов $u_{вх}$, $u_{вых}$ измерять осциллографом.

По АЧХ определить полосу пропускания усилителя для коэффициента частотных искажений на высоких частотах $M_B = \sqrt{2}$;

д) определить максимальную скорость нарастания выходного напряжения ОУ. Для этого подать от функционального генератора прямоугольный сигнал

частотой 20...40 кГц и максимальной амплитуды. Скорость нарастания определить по осциллографу.

е) по результатам опыта построить характеристики усилителя, определить его параметры, обработать осциллограммы, сравнить расчет и опыт.

2.3. Экспериментальное исследование неинвертирующего усилителя.

а) собрать схему согласно рис. 3. Установить заданное преподавателем значение R_3 ;

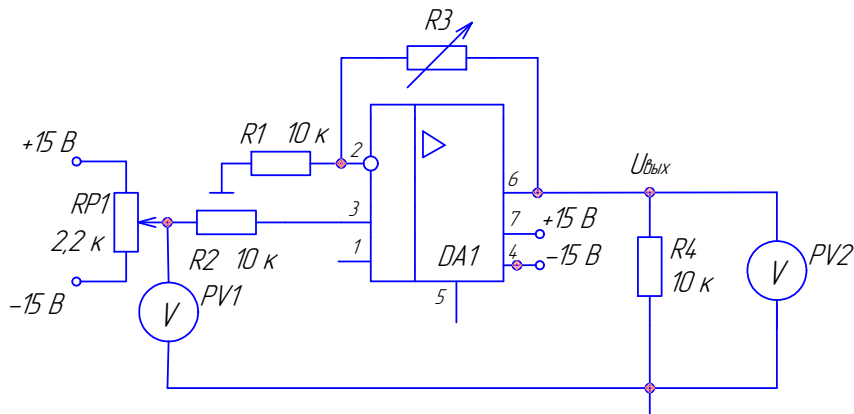


Рис. 3

б) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе $U_{вых} = F(U_{вх})$. В качестве источника сигнала использовать напряжение, регулируемое потенциометром RP1.

По амплитудной характеристике определить коэффициент усиления по напряжению K_u ; выключить питание;

в) снять амплитудные характеристики усилителя при помощи осциллографа для двух значений $R_{ос}$ (R_3). Для опыта необходимо подключить к модулю функциональный генератор (рис. 4). Для снятия зависимости одной величины от другой надо использовать два входа осциллографа **X** и **Y**. Вход **Y** (один вывод) подключается к выходу усилителя, вход **X** – к входу усилителя, а корпус (\perp) к общему проводу (\perp). Развертка луча переключается в положение **X/Y**. Установить на выходе функционального генератора напряжение частотой порядка 100...200 Гц; определить по характеристикам коэффициенты усиления;

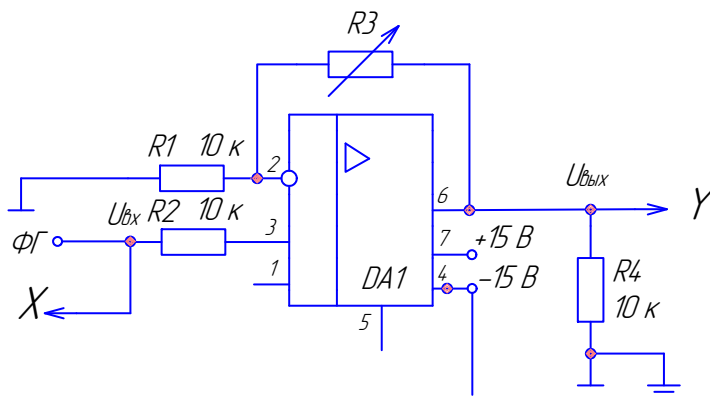


Рис. 4

г) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя $K_u = F(f)$ при $u_{вх} = \text{const}$ для максимального значения $R_{ос}$. Переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Выходной сигнал

усилителя должен находиться на линейном участке амплитудной характеристики. Амплитуды сигналов $u_{вх}$, $u_{вых}$ измерять осциллографом.

По АЧХ определить полосу пропускания усилителя для коэффициента частотных искажений на высоких частотах $M_B = \sqrt{2}$;

д) по результатам опыта построить характеристики усилителя, определить его параметры, обработать осциллограммы, сравнить расчет и опыт.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) выводы по работе: сделать выводы о влиянии сопротивления обратной связи на коэффициенты усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителя и их амплитудные характеристики.

4. Контрольные вопросы

1. Что называется операционным усилителем?
2. Каковы основные параметры операционного усилителя?
3. Почему операционный усилитель, включенный без обратной связи, работает как релейный элемент?
4. Какие допущения принимаются для операционного усилителя при выводе коэффициента усиления с различными обратными связями?
5. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
6. Какой знак будет иметь выходное напряжение инвертирующего усилителя, если на вход подано отрицательное напряжение?
7. Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
8. Как определить полосу пропускания усилителя?
9. Как снять амплитудную характеристику инвертирующего усилителя или компаратора при помощи осциллографа?

РАБОТА № 3-8. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАТОРА И АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

1. Цель работы

Изучение схем включения операционного усилителя (ОУ) с обратными связями в качестве интегратора и активного фильтра.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
ОУ	1
Конденсатор 100 нФ	1
Конденсатор 10 нФ	1
Резистор 10 кОм	3
Резистор с переключателем 10 - 470 кОм	1

Таблица переключений

Таблица 1

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сопротивление	10к	20к	30к	52к	74к	96к	152к	208к	264к	364к	470к

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса "Схемы включения операционного усилителя", содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) нарисовать в масштабе временные диаграммы $u_{\text{вх}}$ и $u_{\text{вых}}$ для заданной преподавателем частоты f знакопеременного прямоугольного сигнала $u_{\text{вх}}$. При этом предварительно найти амплитуду U_m прямоугольного сигнала $u_{\text{вх}}$, при которой выходной сигнал $u_{\text{вых}}$ интегратора имеет пилообразную форму с амплитудой U_{nm} , равной максимальному напряжению на выходе ОУ ($U_{\text{вых. max}} = 12 \text{ В}$).

Напряжение на выходе интегратора при постоянном входном сигнале изменяется по линейному закону

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{U_{\text{вх}} \cdot t}{T_u} + U_{\text{вых}}(0), \quad (1)$$

где $T_u = R_1 \cdot C_2$ – постоянная времени интегрирования;

$U_{\text{вых}}(0)$ – напряжение на выходе интегратора в момент времени 0.

При периодическом прямоугольном входном сигнале напряжение на выходе интегратора имеет пилообразную форму с амплитудой U_{nm} (рис. 1).

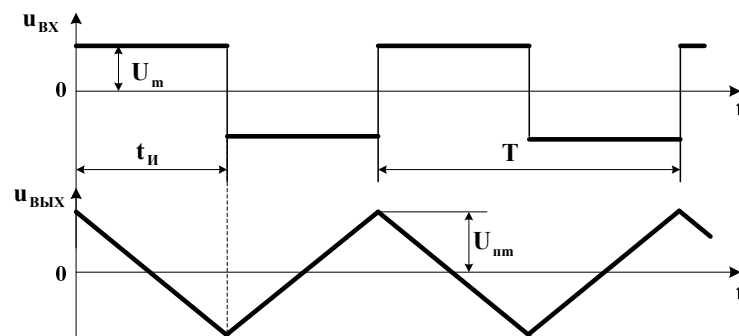


Рис. 1

В реальной схеме интегратора вследствие дрейфа нуля ОУ сигнал на выходе $u_{\text{вых}}$ оказывается смещенным относительно нуля. Для получения симметричного сигнала $u_{\text{вых}}$ относительно нуля примем $U_{nm} = U_{\text{вых. max}}$ и найдем требуемую амплитуду прямоугольного входного сигнала U_m . Для интервала времени t_u (рис. 3.7.1) подставим в уравнение (1): $u_{\text{вых}}(t) = -U_{nm} = -U_{\text{вых. max}}$; $t = t_u = T/2$; $U_{\text{вх}} = U_m$; $U_{\text{вых}}(0) = U_{nm} = U_{\text{вых. max}}$, тогда

$$U_m = \frac{4 \cdot U_{nm} \cdot T_u}{T}, \quad (2)$$

где $T = 1/f$ – период прямоугольного входного сигнала.

2.2. Исследование интегратора:

а) собрать схему интегратора согласно рис. 2, установить заданное преподавателем значения емкости C ;

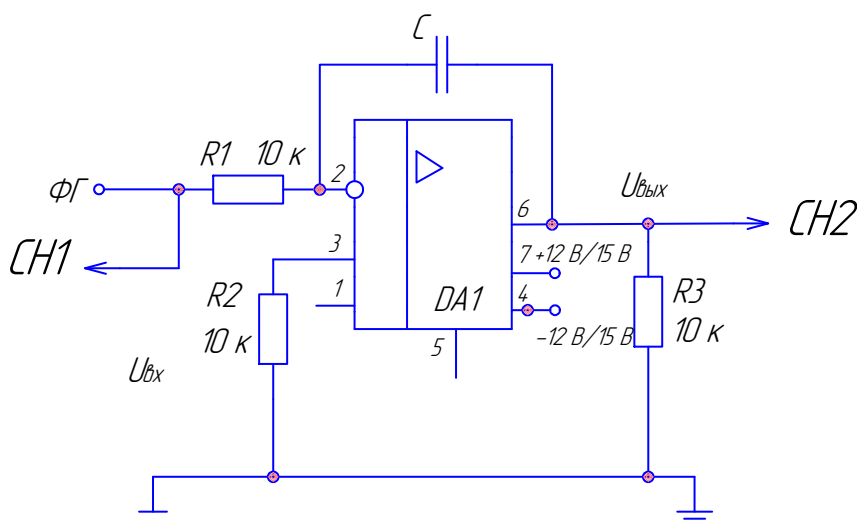


Рис. 2

б) исследовать работу интегратора в режиме генератора пилообразного напряжения (рис. 1). Для этого на функциональном генераторе установить прямоугольное знакопеременное напряжение с заданной частотой f и амплитудой U_m , рассчитанной в п. 2.1 в). Напряжение на входе $u_{\text{вх}}$ и выходе $u_{\text{вых}}$ контролировать при помощи осциллографа. При необходимости подстроить потенциометром RP1 амплитуду U_m знакопеременного прямоугольного сигнала так, чтобы пилообразный выходной сигнал интегратора стал симметричным относительно нуля с амплитудой $U_{nm} = U_{\text{вых. max}}$ (рис. 1). Зарисовать осциллограммы

$u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$. Сравнить полученные результаты с расчетом по значениям U_m, f, U_{nm} ;

в) снять и построить зависимость амплитуды выходного напряжения от частоты $U_{nm} = F(f)$ при постоянной амплитуде синусоидального входного напряжения. Амплитуды U_{exm} и $U_{выхm}$ замерять при помощи осциллографа. Результаты заносить в таблицу. Построить зависимость $U_{выхm} = F(f)$. Выключить питание модуля.

2.3. Исследование активного фильтра:

а) собрать схему активного фильтра согласно рис. 3. Сопротивление резистора с переключением RP2 и величину емкости конденсатора С установить в соответствии с указанным преподавателем;

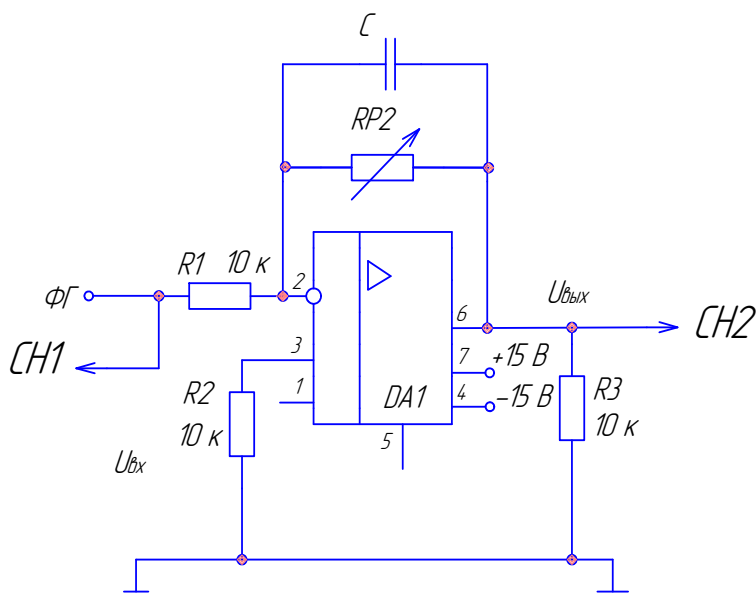


Рис. 3

- б) снять и построить амплитудно-частотную характеристику активного фильтра при заданных параметрах элементов фильтра;
- в) повторить опыт при других значениях параметров фильтра;
- г) определить полосы пропускания исследованных активных фильтров.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) сделать выводы по работе: о влиянии частоты входного напряжения и емкости конденсатора обратной связи на амплитуду выходного пилообразного напряжения в интеграторе; о влиянии параметров на полосу пропускания активного фильтра.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
2. Как получить на выходе интегрирующего усилителя пилообразное напряжение?
3. Как определяется постоянная времени интегрирования?
4. Какое соотношение должно быть между длительностью импульса, поступающего на вход интегрирующего усилителя, и постоянной времени интегрирования для того, чтобы на выходе избежать ошибки интегрирования?
5. Что такое активный фильтр?
6. Как определить по амплитудно-частотной характеристике полосу пропускания фильтра?
7. От каких элементов схемы и как зависит полоса пропускания активного фильтра?

Работа № 3-9. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАРАТОРОВ

1. Цель работы

Изучение схем включения операционных усилителей в качестве двухвходовых обычных и регенеративных компараторов.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
ОУ	1
Потенциометр 2,2 кОм	1
Резистор 10 кОм	3
Резистор с переключателем 10 – 470 кОм	1

Таблица переключений

Таблица 1

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сопротивление	10к	20к	30к	52к	74к	96к	152к	208к	264к	364к	470к

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса "Схемы включения операционного усилителя"; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальной схемой, приведенной в руководстве начертить схему соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) нарисовать в масштабе временные диаграммы входного и выходного напряжений в регенеративном компараторе, если на инвертирующий вход подано синусоидальное напряжение с амплитудой 3,0 В и заданным преподавателем значением частоты $f_{вх}$, а на неинвертирующий – постоянное опорное напряжение $U_{оп}$.

Определить ширину петли гистерезиса $U_2 = 2U_{пор}$, где $U_{пор}$ – напряжение порога срабатывания.

$$U_{пор} = \frac{U_{вых} R_3}{R_2 + R_3}, \quad \text{где } U_{вых} = \pm E = \pm 15 \text{ В.}$$

2.2. Исследование двухвходового компаратора и регенеративного компаратора с положительной обратной связью (триггера Шмидта):

а) собрать схему двухвходового компаратора с положительной обратной связью согласно рис. 1. В качестве резистора обратной связи R_3 применить переключаемый резистор 10...470 кОм. В качестве опорного напряжения $U_{оп}$ использовать регулируемое постоянное напряжение. На инвертирующий вход подключить функциональный генератор, используя у него выход "~";

б) снять характеристики передачи компаратора без обратной связи и для двух значений сопротивлений обратной связи при заданном опорном напряжении. Измерение опорного напряжения можно производить мультиметром на пределе 20 В. Выходное напряжение необходимо подключить на вход Y осциллографа, входное напряжение – на вход X. Изменяя величину переменного сигнала на

инвертирующем входе, добиться появления на выходе прямоугольных импульсов. После переключения развертки осциллографа в положение **X/Y** зарисовать характеристики. Определить масштабы по осям **Y** и **X**;

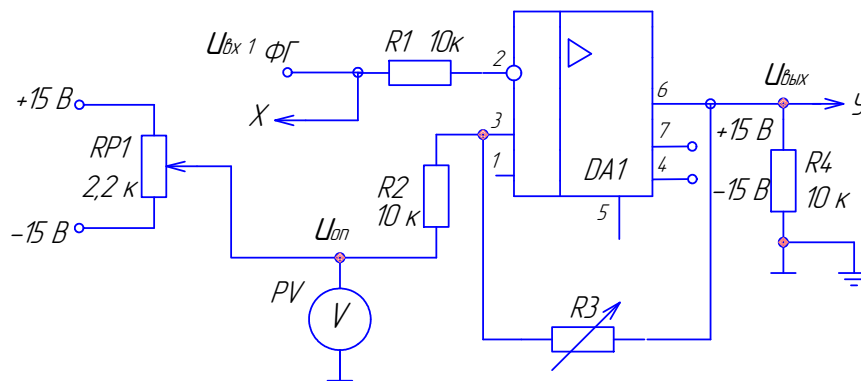


Рис. 1

в) снять осциллограммы работы компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений. Установить амплитуду переменного напряжения 3,0 В с частотой 1 кГц. Установить заданное опорное напряжение. Зарисовать с экрана осциллографа входные напряжения u_{ex1} , $U_{оп}$ и выходное напряжение $u_{вых}$.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) выводы по работе: сделать выводы о влиянии сопротивления в цепи обратной связи регенеративного компаратора на его передаточную характеристику.

4. Контрольные вопросы

1. Что называется компаратором?
2. Зачем в компараторе применяется положительная обратная связь?
3. Как получить периодические прямоугольные импульсы на выходе компаратора?
4. Как зависит вид характеристики передачи регенеративного компаратора от сопротивления обратной связи.
5. Как снять амплитудную характеристику компаратора при помощи осциллографа?

Работа № 3-10. ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ

1. Цель работы

Изучение схем включения и характеристик симметричного и несимметричного мультивибратора, выполненного на базе операционного усилителя (ОУ).

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
ОУ	1
Конденсатор 100 нФ	1
Конденсатор 10 нФ	1
Резистор 10 кОм	3
Резистор 200 кОм	1
Резистор с переключателем 10 – 470 кОм	1
Диод 1 А	2

Таблица переключений

Таблица 1

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сопротивление	10к	20к	30к	52к	74к	96к	152к	208к	264к	364к	470к

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса "Мультивибраторы", содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальной схемой, приведенной в руководстве начертить схему соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) в соответствии с заданными преподавателем параметрами определить частоту на выходе мультивибратора:

$$f = 1/T, \quad (1)$$

$$T = 2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot \ln \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_3} \right). \quad (2)$$

Нарисовать в масштабе временные диаграммы напряжений на выходе $u_{вых}$, на инвертирующем входе u_c и неинвертирующем входе u_{oc} в схеме рис. 1.

2.2. Исследование симметричного мультивибратора:

а) собрать схему мультивибратора (рис. 1), установить заданные преподавателем значения емкости конденсатора С и сопротивления резистора R1; в качестве R1 использовать резистор с переключателем;

б) снять осциллограммы напряжений в схеме мультивибратора. Зарисовать с экрана осциллографа выходное напряжение $u_{вых}$ и напряжение на инвертирующем входе u_c . Обработать осциллограммы. Определить частоту на выходе мультивибратора. Определить масштабы. Сравнить значение частоты, полученное экспериментально, с расчетным значением;

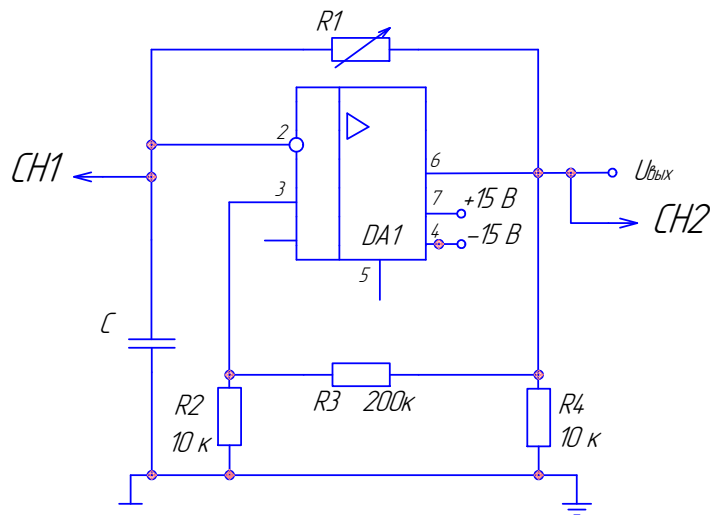


Рис. 1

в) исследовать влияние сопротивлений $R1$ и $R3$ и конденсатора C на изменение частоты на выходе мультивибратора. Для этого определить выходную частоту мультивибратора при другом значении резистора $R1$. Установить первоначальное значение сопротивления $R1$. Аналогичные действия повторить для конденсатора C . Поменять местами резисторы $R1$ и $R3$; исследовать влияние обратной связи.

2.3. Исследование несимметричного мультивибратора:

а) собрать схему несимметричного мультивибратора (рис. 2); установить заданные значения емкости конденсатора C и сопротивления резистора $R1$;

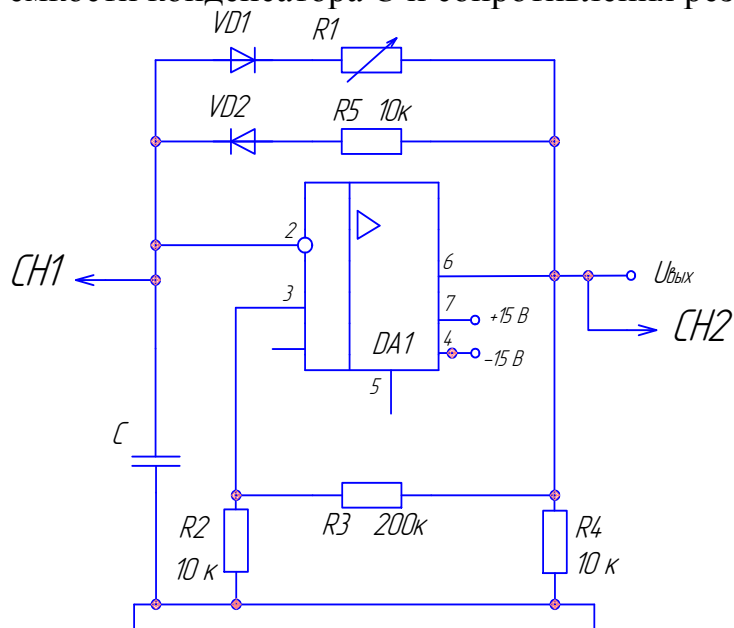


Рис. 2

б) снять осциллограммы напряжений в схеме мультивибратора. Зарисовать с экрана осциллографа выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ и напряжение на инвертирующем входе u_c . Обработать осциллограммы. Определить частоту на выходе мультивибратора. Определить соотношение времени положительного и отрицательного импульсов. Определить масштабы.

в) исследовать влияние сопротивления $R1$ на изменение частоты и соотношение времени положительного и отрицательного импульсов на выходе мультивибратора.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе:
 - о влиянии сопротивлений резисторов и емкости конденсатора на выходную частоту мультивибратора;
 - о влиянии сопротивлений на соотношение времени положительного и отрицательного импульсов на выходе мультивибратора.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое мультивибратор?
2. Принцип работы симметричного мультивибратора.
3. Принцип работы несимметричного мультивибратора.
4. Как можно изменить частоту на выходе мультивибратора?
5. Как можно изменить соотношение времени положительного и отрицательного импульсов на выходе мультивибратора?

Работа № 3-11. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1. Цель работы

Изучение характеристик и функций простейших логических элементов.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Микросхема 2И-НЕ	1
Потенциометр 10 кОм	1
Резистор 1 кОм	1
Резистор 10 кОм	2
Стабилитрон 4,7 В	1
Тумблер	2

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса “Цифровые интегральные микросхемы”, содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) построить временные диаграммы работы для логического элемента 2И-НЕ при заданной последовательности импульсов.

2.2. Исследование логического элемента 2И-НЕ:

а) собрать схему согласно рис. 1; в качестве вольтметра использовать мультиметр;

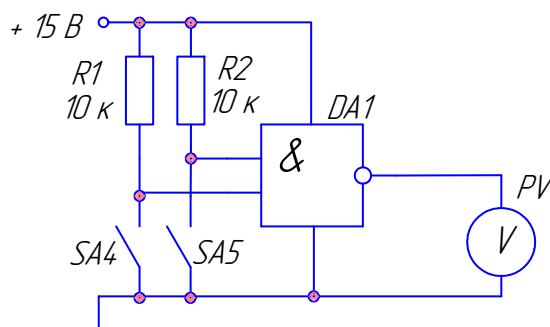


Рис. 1

б) проверить логику работы элемента 2И-НЕ. На входы элемента через резисторы R1 и R2 подается +15 В (единица). При включении тумблеров SA4 и SA5 на входы подаются нули. Задавая различные комбинации входных логических сигналов занести результаты в табл. 1. Выходной сигнал контролируется мультиметром;

Таблица 1

U_{BX1}	U_{BX2}	$U_{ВЫХ}$
0	0	
1	0	
0	1	
1	1	

в) проверить работу логического элемента 2И-НЕ, подавая прямоугольное напряжение частотой 10 кГц на вход 1 и постоянное напряжение (5 или 0 В) на вход 2 элемента с помощью тумблера SA4. Для контроля вида входных и выходных сигналов к соответствующим гнездам подключать двухканальный осциллограф (рис. 2). Зарисовать осциллограммы входных и выходных сигналов. На основе

осциллограмм составить таблицу истинности элемента 2И-НЕ.

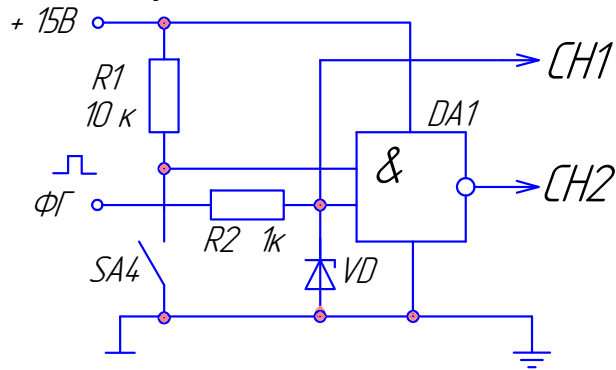


Рис. 2

г) снять передаточную характеристику логического элемента 2И-НЕ. Собрать схему согласно рис. 3. Изменяя напряжение на входе, контролировать напряжение на выходе. Измерения производить повышая входное напряжение от 0 до максимального, а затем снижая его до 0. Построить передаточную характеристику. Определить уровни $U_{вых}^0; U_{вых}^1; U_{пор}^0; U_{пор}^1$; определить статическую помехоустойчивость $U_{н.см.}^1; U_{н.см.}^0$;

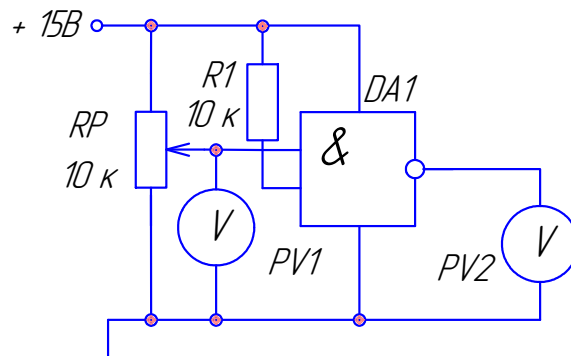


Рис. 3

д) снять передаточную характеристику логического элемента 2И-НЕ на переменном токе в соответствии с рис. 4. Определить параметры микросхемы аналогично п.2.2,г.

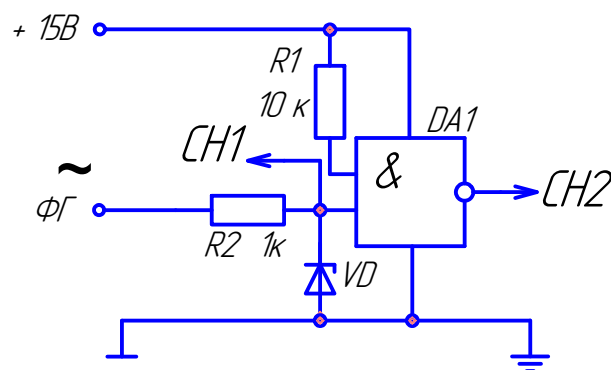


Рис. 4

2.3. Исследование RS-триггера с инверсным управлением:

а) собрать схему согласно рис. 5;

б) задать различные комбинации входных логических сигналов на входах R и S , с помощью тумблеров SA4 и SA5; составить таблицу переключений триггера. Результаты занести в табл. 3;

Таблица 3

\bar{S}	\bar{R}	Q_{t-1}	Q_t	\bar{Q}_t
0	1	1		
1	1	1		
1	0	1		
1	1	0		
0	1	0		
1	1	0		

Примечания:

1) Индекс t соответствует настоящему состоянию триггера, $t-1$ – предыдущему.

2) В состояние Q_t триггер переводить, подавая соответствующие логические сигналы на входы S и R .

3) Комбинация входных сигналов $R = S = 0$ считается запрещенной. Подумайте почему.

Выполнить эту комбинацию сигналов.

в) составить таблицу переключений RS-триггера.

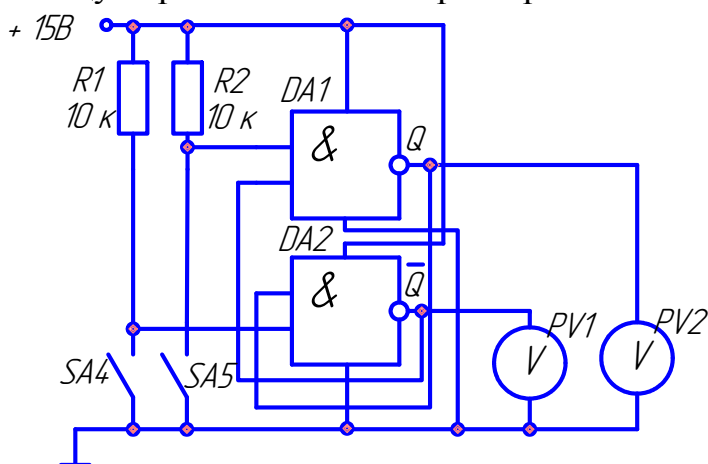


Рис. 5

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;
- таблицы состояний и временные диаграммы входных и выходных напряжений;
- построенные характеристики;
- обработанные осциллограммы;
- выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

- Чем отличаются последовательные схемы от комбинационных?
- Какие операции выполняет логический элемент 2И-НЕ?
- Что такое передаточная характеристика логического элемента?
- Как выглядят передаточные характеристики элементов И-НЕ?
- Составьте таблицу истинности и нарисуйте схемное обозначения трехвходовых логических элементов И-НЕ.

Работа № 3-12. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Цель работы

Ознакомление с применением выпрямительных диодов в неуправляемых выпрямителях.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Выпрямительный диод 1 А	1
Резистор 120 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Конденсатор 220 мкФ	1
Дроссель 200 мГн	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Диоды», «Неуправляемые выпрямители» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a .

2.2. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на диоде:

а) собрать схему выпрямителя по рис. 1. В качестве вольтметров использовать: PV2 в режиме измерения переменного напряжения, PV1 в режиме измерения постоянного напряжения. Подключить входы осциллографа. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа Вы увидите осциллограммы анодного тока и напряжения на диоде;

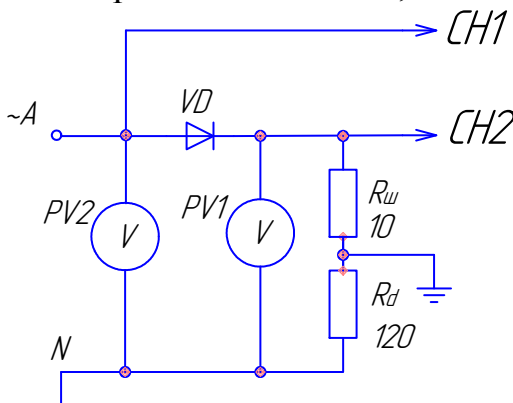


Рис. 1

б) снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и анодного тока i_a . Снять осциллограмму напряжения на нагрузке u_d , переключив корпус осциллографа (\perp)

на общий провод (\perp), не забудьте определить масштабы по току и напряжению;

в) измерить с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

г) включить конденсатор параллельно сопротивлению нагрузки (рис. 2); снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и анодного тока i_a . Снять осциллограмму напряжения на нагрузке u_d , переключив корпус осциллографа (\perp) на общий провод (\perp);

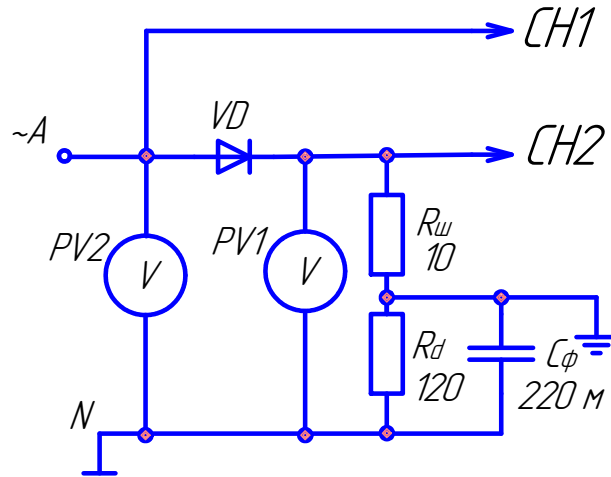


Рис. 2

д) определить связь между переменным напряжением и постоянным напряжением на нагрузке;

е) включить дроссель последовательно с нагрузкой (рис. 3); снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и анодного тока i_a , снять осциллограмму напряжения на нагрузке u_d , переключив корпус осциллографа (\perp) на общий провод (\perp);

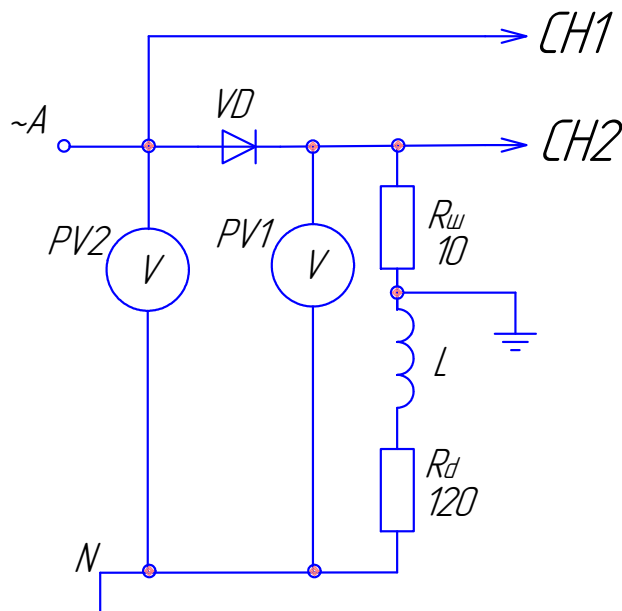


Рис. 3

ж) определить связь между переменным напряжением и постоянным напряжением;

з) сравнить результаты опытов.

3. Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) выводы по работе, ответить на контрольные вопросы 3 – 6.

4. Контрольные вопросы

- 1. Как работает неуправляемый выпрямитель?
- 2. Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
- 3. Как и почему влияет конденсатор фильтра на форму напряжения на нагрузке и на форму анодного тока?
- 4. Как влияет конденсатор на величину напряжения на нагрузке?
- 5. Как и почему влияет дроссель на напряжение на нагрузке и форму анодного тока?
- 6. Как и почему влияет дроссель на величину напряжения на нагрузке?

Работа № 3-13. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Цель работы

Ознакомление с применением тиристоров в управляемых выпрямителях.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Тиристор 1 А	1
Резистор 1,5 кОм	1
Резистор 120 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Конденсатор 220мкФ	1
Конденсатор 1 мкФ	1
Дроссель 200 мГн	1
Потенциометр 10 кОм	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

- изучить тему курса «Управляемые выпрямители» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;
- пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;
- построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a для заданного преподавателем угла управления при активной нагрузке.

2.2. Экспериментальное исследование однополупериодного управляемого выпрямителя на тиристоре:

а) собрать схему управляемого выпрямителя по рис. 1. Цепь $RP1$, C служит для изменения фазы напряжения, подаваемого на управляющий электрод. В качестве вольтметров использовать: $PV2$ в режиме измерения переменного напряжения и $PV1$ в режиме измерения постоянного напряжения. Подключить входы осциллографа. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети;

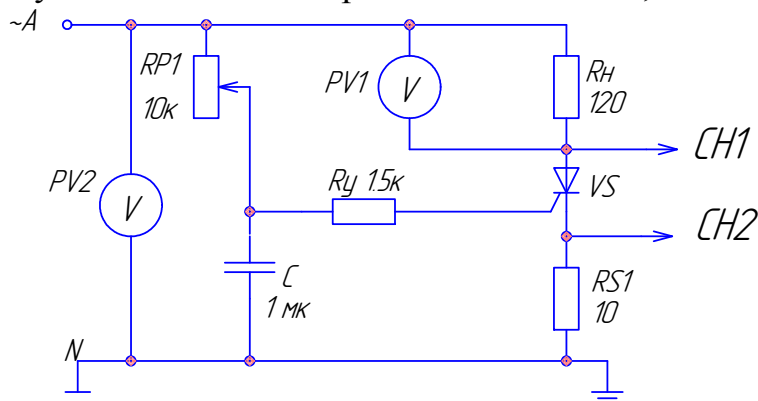


Рис. 1

- установить заданный угол управления, регулируя сопротивление реостата

RP1; снять осциллограммы напряжения на тиристоре u_a и анодного тока i_a . Снять осциллограмму выпрямленного напряжения на нагрузке u_d , переключив осциллограф согласно рис. 2 (не забудьте определить масштабы по току и напряжению);

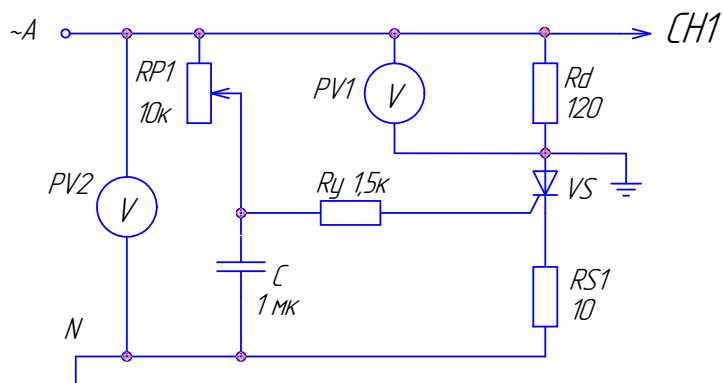


Рис. 2

в) снять регулировочную характеристику выпрямителя $U_d=f(\alpha)$. Регулируя сопротивление реостата RP1, изменять угол управления α и построить регулировочную характеристику;

г) включить в цепь нагрузки индуктивность L_d (рис. 3 и 4), снять те же осциллограммы при заданном угле управления и активно-индуктивной нагрузке;

д) снять регулировочную характеристику тиристора $U_d=f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке и нанести ее на тот же график, что и регулировочную характеристику при активной нагрузке;

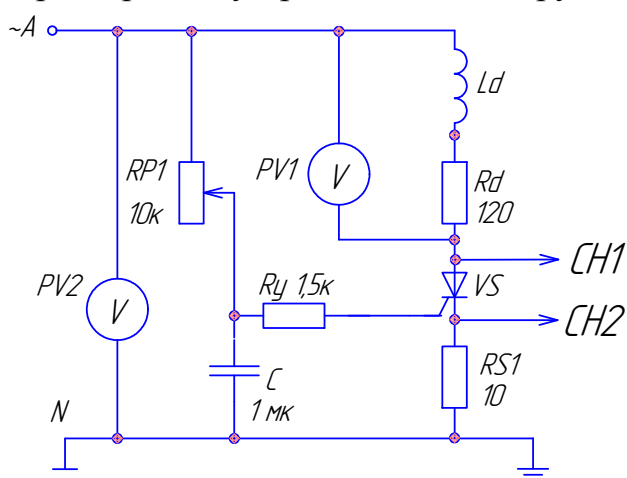


Рис. 3

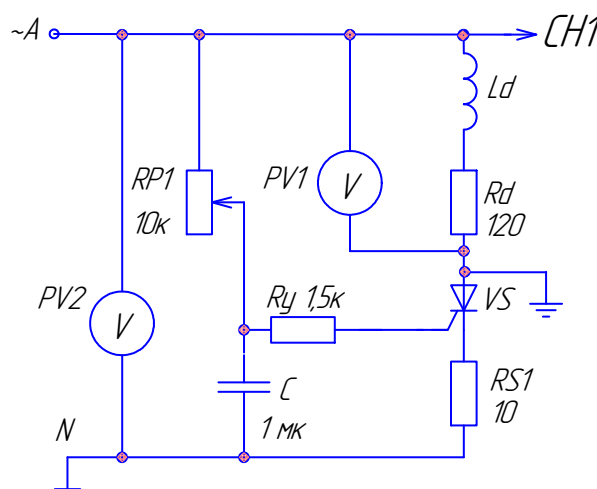


Рис. 4

е) включить конденсатор параллельно активному сопротивлению нагрузки (рис. 5), снять те же осциллограммы при заданном угле управления и активно-индуктивно-емкостной нагрузке (при малых пульсациях напряжения на конденсаторе это эквивалентно работе на противо-ЭДС); дополнительно снять осциллограмму напряжения на конденсаторе (рис. 6), установив одинаковые масштабы по напряжению в каналах CH1 И CH2;

ж) снять регулировочную характеристику тиристора $U_d=f(\alpha)$ при активно-индуктивно-емкостной нагрузке и нанести ее на тот же график, что и регулировочную характеристику при активной нагрузке;

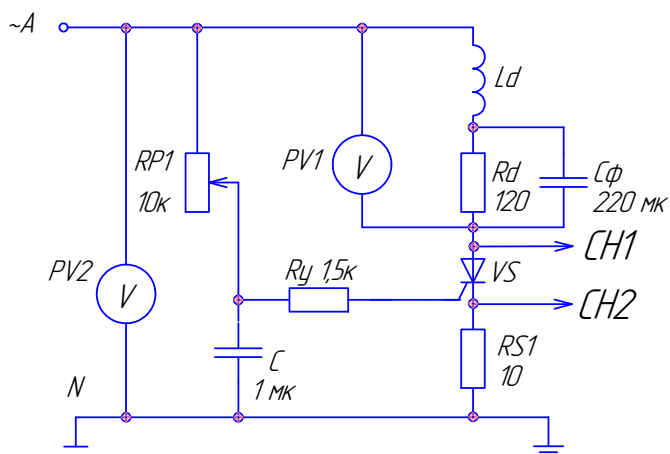


Рис. 5

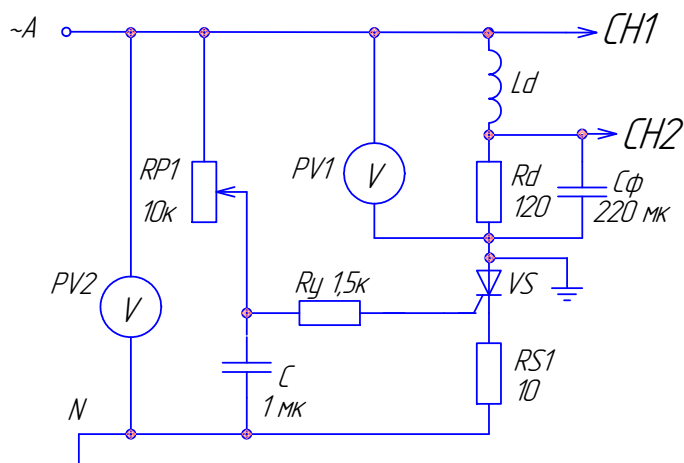


Рис. 6

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы соединений для выполненных экспериментов;
- результаты экспериментальных исследований, помещенные в соответствующие таблицы и построенные по ним регулировочные характеристики;
- обработанные осциллограммы;
- выводы по работе, ответить на контрольные вопросы 3 – 5.

4. Контрольные вопросы

- Как работает управляемый выпрямитель?
- Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
- Как и почему влияет конденсатор фильтра на форму напряжения на нагрузке и на форму анодного тока?
- Как влияет конденсатор на величину напряжения на нагрузке?
- Как и почему влияет дроссель на напряжение на нагрузке и форму анодного тока?

Работа № 3-14. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

1. Цель работы

Исследование электромагнитных процессов и характеристик выпрямителя, выполненного по однофазной мостовой схеме.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Выпрямительный мост 1 А	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 68 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 330 Ом	1
Резистор 680 Ом	1
Конденсатор 220 мкФ	1
Дроссель 200мГн	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Неуправляемые выпрямители» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) построить в масштабе временные диаграммы при заданном преподавателем значении синусоидального напряжения u , а также диаграммы выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при активной нагрузке и при активно-индуктивной нагрузке (при $L_d = \infty$).

2.2. Экспериментальное исследование однофазной мостовой схемы выпрямления при активной нагрузке:

а) собрать схему выпрямителя по рис. 1. Установить заданное значение сопротивления нагрузки R_d . В качестве вольтметров использовать: PV2 в режиме измерения переменного напряжения, а PV1 в режиме измерения постоянного напряжения. Включить цифровой амперметр в режим измерения постоянного тока. Подключить входы осциллографа. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа наблюдать осциллограммы выпрямленного тока и выпрямленного напряжения;

б) снять осциллограмму выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограмму напряжения на диоде u_a , переключив входы осциллографа согласно рис. 2. (не забудьте определить масштабы по току и напряжению);

в) измерить напряжения с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

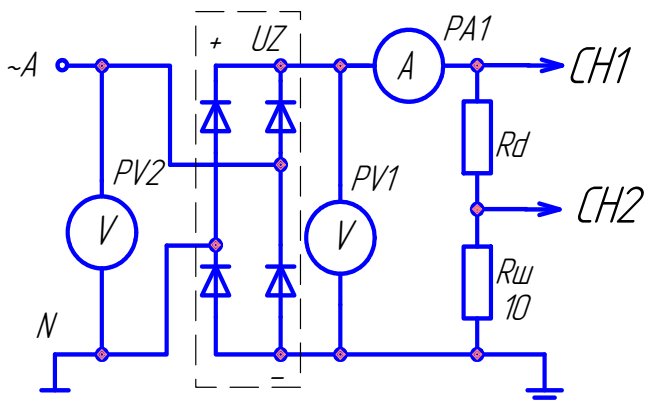


Рис. 1

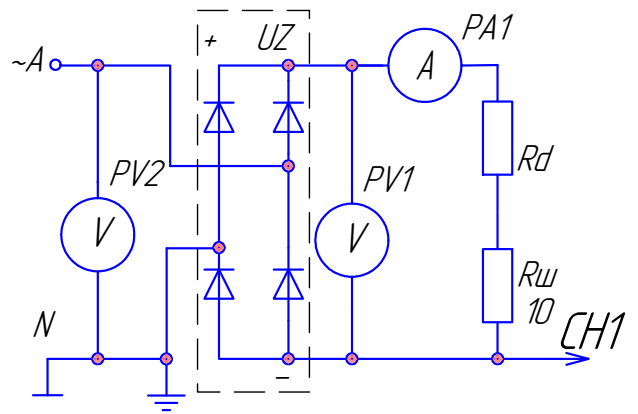


Рис. 2

г) дискретно изменяя сопротивление нагрузки R_d (68; 150; 330; 680 Ом), снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

2.3. Экспериментальное исследование однофазной мостовой схемы выпрямления при активно-индуктивной нагрузке:

а) включить дроссель L_d последовательно с нагрузкой (рис. 3); снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограмму напряжения на диоде u_a , переключив входы осциллографа согласно рис. 4 (не забудьте определить масштабы по току и напряжению);

б) измерить напряжения с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

в) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (68; 150; 330; 680 Ом), снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$

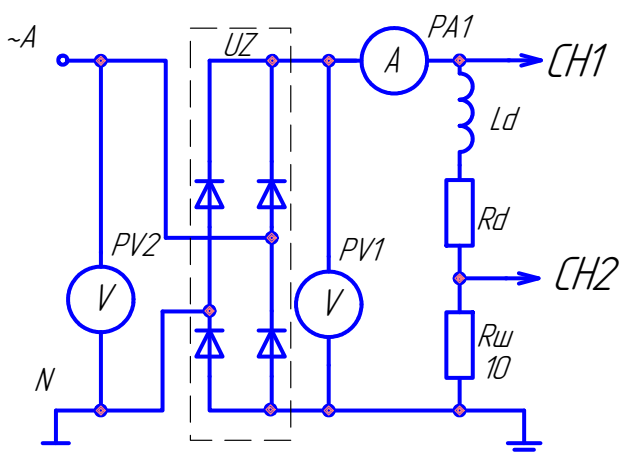


Рис. 3

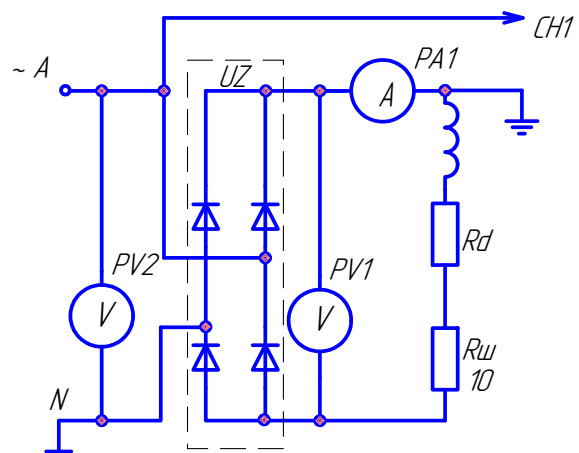


Рис. 4

2.4. Экспериментальное исследование однофазной мостовой схемы выпрямления при активно-емкостной нагрузке:

а) включить конденсатор параллельно сопротивлению нагрузки (рис. 5); снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограмму напряжения на диоде u_a , переключив входы осциллографа согласно рис. 6 (не забудьте определить масштабы по току и напряжению);

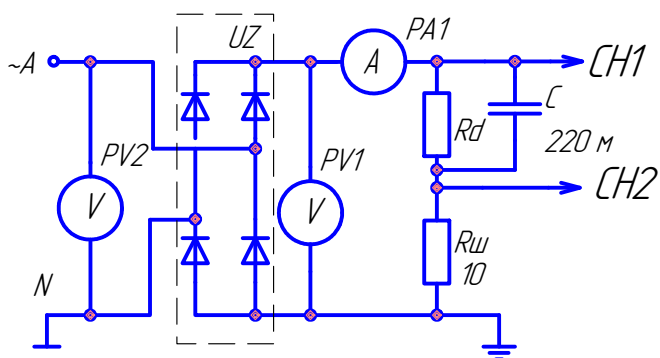


Рис. 5

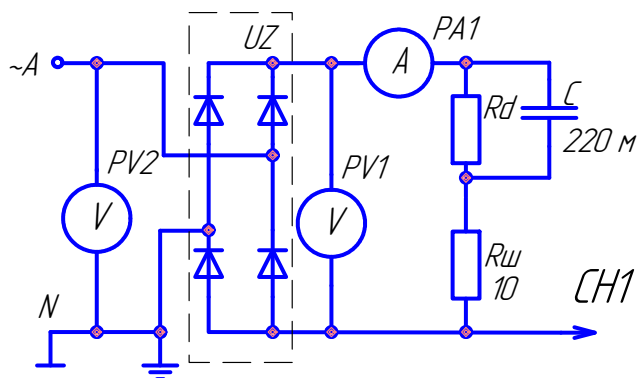


Рис. 6

б) измерить напряжения с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

в) изменяя сопротивление нагрузки снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы соединений для выполненных экспериментов;
- результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; сравнить результаты опытов
- обработанные осциллограммы.
- выводы по работе, ответить на контрольные вопросы 3 – 6.

4. Контрольные вопросы

- Покажите путь тока в однофазной мостовой схеме.
- Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
- Как и почему влияет конденсатор фильтра на форму напряжения на нагрузке и на форму анодного тока?
- Как влияет конденсатор на величину напряжения на нагрузке?
- Как и почему влияет дроссель на напряжение на нагрузке и форму анодного тока?
- Как и почему влияет дроссель на величину напряжения на нагрузке?
- Что такое внешняя характеристика?
- От чего зависит вид внешней характеристики?

Работа № 3-15. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

1. Цель работы

Исследование электромагнитных процессов и характеристик трехфазной нулевой и трехфазной мостовой схем выпрямления.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Выпрямительный мост 1 А	1
Диод 1А	1
Диод Шоттки 1 А	1
Резистор 1 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 100 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 330 Ом	1
Резистор 680 Ом	1
Резистор 1 кОм	1
Дроссель 200мГн	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Неуправляемые многофазные выпрямители» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) построить в масштабе временные диаграммы заданного преподавателем синусоидального напряжения u , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при активной нагрузке и при активно-индуктивной нагрузке (при $L_d = \infty$) для трехфазной мостовой схемы.

г) построить в масштабе временные диаграммы заданного преподавателем синусоидального напряжения u , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при активной нагрузке и при активно-индуктивной нагрузке (при $L_d = \infty$) для трехфазной нулевой схемы.

2.2. Экспериментальное исследование трехфазной нулевой схемы выпрямления при активной нагрузке:

а) собрать схему выпрямителя по рис. 1. В качестве диода VD1 включить диод Шоттки. Установить заданное значение сопротивления нагрузки R_n . В качестве вольтметров использовать: PV2 в режиме измерения переменного напряжения, а PV1 в режиме измерения постоянного напряжения. Включить цифровой амперметр в режим постоянного тока. Подключить входы осциллографа. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа наблюдать осциллограммы выпрямленного тока и выпрямленного напряжения;

б) снять осциллограмму выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и тока через диод i_a ,

переключив входы осциллографа согласно рис. 2. (не забудьте определить масштабы по току и напряжению);

в) измерить напряжения с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

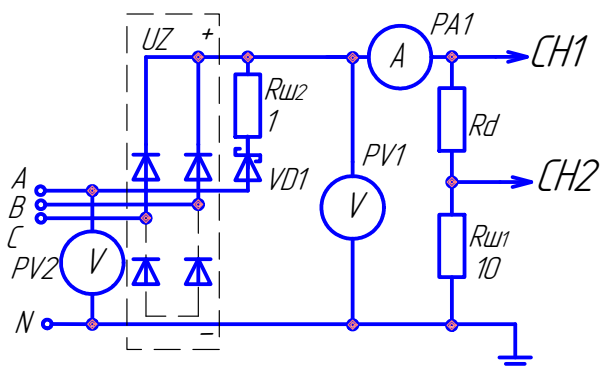


Рис. 1

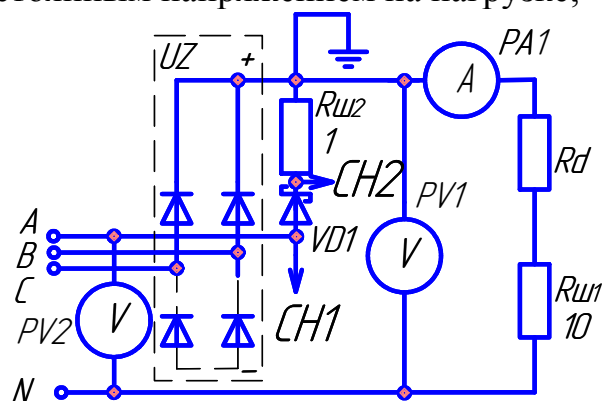


Рис. 2

г) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (100; 150; 330; 680 Ом), снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

2.3. Экспериментальное исследование трехфазной нулевой схемы выпрямления при активно-индуктивной нагрузке:

а) включить дроссель последовательно с нагрузкой (рис. 3); снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и тока через диод i_a , переключив входы осциллографа согласно рис. 4 (не забудьте определить масштабы по току и напряжению); определить угол коммутации γ ;

б) измерить напряжения с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

в) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (100; 150; 330; 680 Ом), снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

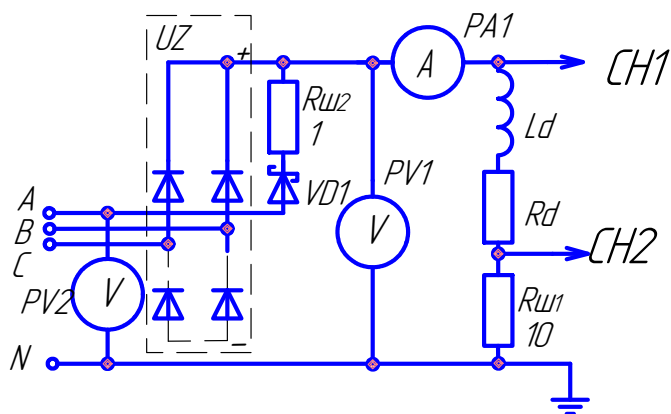


Рис. 3

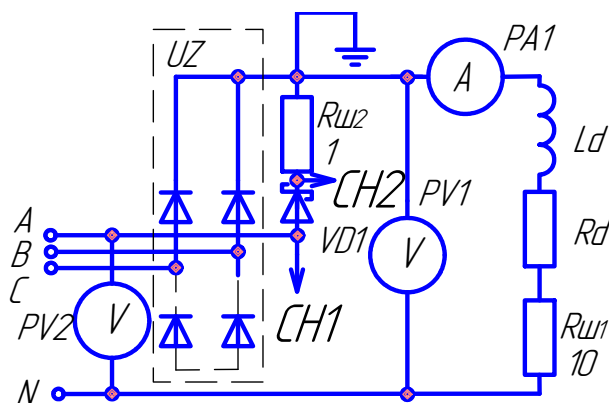


Рис. 4

2.4. Экспериментальное исследование трехфазной мостовой схемы выпрямления при активной нагрузке:

а) собрать схему выпрямителя по рис. 5. Установить заданное значение сопротивления нагрузки R_n . В качестве вольтметров использовать: PV2 в режиме измерения переменного напряжения, а мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения. Включить цифровой амперметр в режим постоянного тока. Подключить входы осциллографа. Переключатель развертки осциллографа

перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа наблюдать осциллограммы выпрямленного тока и выпрямленного напряжения;

б) снять осциллограмму выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и анодного тока i_a , переключив входы осциллографа согласно рис. 6. (не забудьте определить масштабы по току и напряжению);

в) измерить напряжения с помощью вольтметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

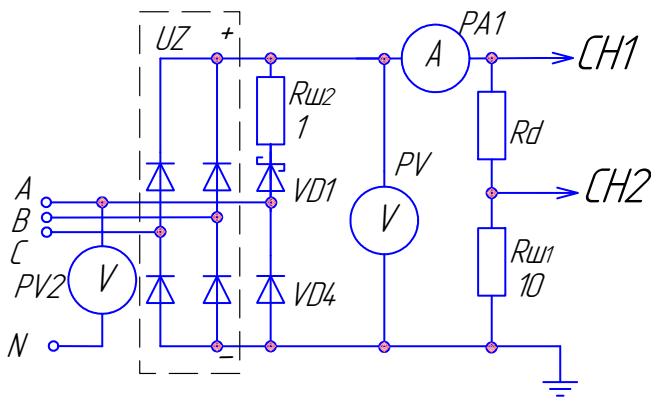


Рис. 5

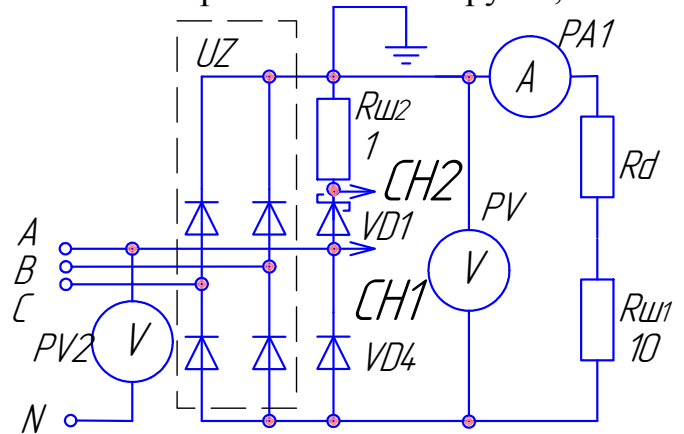


Рис. 6

г) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (330; 680 Ом; 1 кОм), снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

2.5. Экспериментальное исследование трехфазной мостовой схемы выпрямления при активно-индуктивной нагрузке:

а) включить дроссель последовательно с нагрузкой (рис. 7); снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d ; снять осциллограммы напряжения на диоде u_a и анодного тока i_a , переключив входы осциллографа согласно рис. 8 (не забудьте определить масштабы по току и напряжению); определить угол коммутации γ ;

б) измерить напряжения с помощью мультиметров и определить связь между переменным напряжением питания и постоянным напряжением на нагрузке;

в) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (330; 680 Ом; 1 кОм), снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$

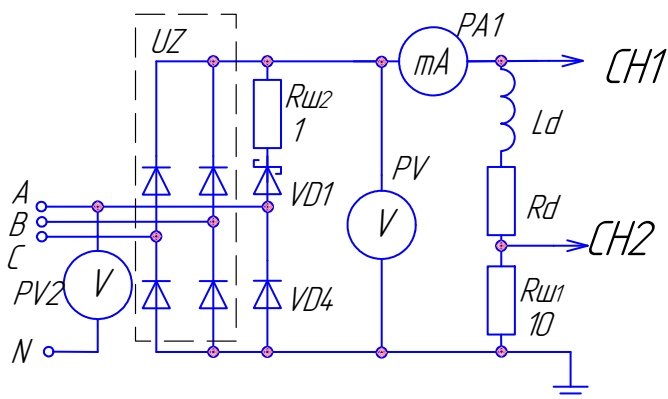


Рис. 7

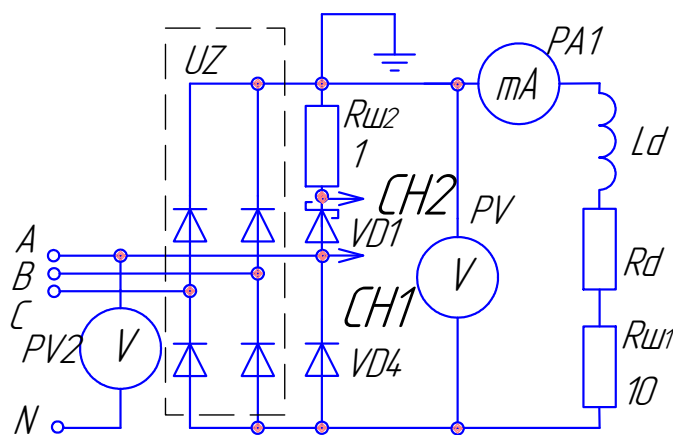


Рис. 8

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы соединений для выполненных экспериментов;
- результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; сравнить результаты опытов
- обработанные осциллограммы.
- выводы по работе, ответить на контрольные вопросы 3 – 6.

4. Контрольные вопросы

- Покажите путь тока в трехфазной нулевой схеме.
- Покажите путь тока в трехфазной мостовой схеме.
- Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
- Как и почему влияет дроссель на вид напряжения на нагрузке и форму выпрямленного и анодного токов?
- Что такое внешняя характеристика?
- От чего зависит наклон внешней характеристики?
- Сравните показатели трехфазной мостовой и трехфазной нулевой схем.

Работа № 3-16. ИССЛЕДОВАНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

1. Цель работы

Исследование свойств сглаживающих фильтров: емкостного, индуктивного и Г-образного.

Перечень минимодулей

Наименование минимодулей	Количество
Выпрямительный мост 1 А	1
Резистор 68 Ом	1
Резистор 10 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 330 Ом	1
Резистор 680 Ом	1
Конденсатор 220 мкФ	1
Дроссель 200мГн	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Сглаживающие фильтры» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) по заданным преподавателем параметрам схемы рассчитать коэффициент пульсаций q для емкостного фильтра: $q = \frac{I}{m\omega CR_d}$, где ω – угловая частота сети;

m – пульсность (произведение числа фаз на число выпрямляемых полупериодов);

г) по заданным параметрам схемы рассчитать коэффициент сглаживания s и коэффициент пульсаций q на выходе индуктивного фильтра: $s \approx \frac{m\omega L_d}{R_d}$, $q = \frac{q_1 R_d}{m\omega L_d}$,

где q_1 – коэффициент пульсации на входе фильтра;

д) по заданным параметрам схемы рассчитать коэффициент сглаживания s и коэффициент пульсаций q на выходе Г-образного фильтра.

$$s \approx m^2 \omega^2 L_d C; \quad q = \frac{q_1}{S}.$$

При этом должны выполняться условия: $m\omega L_d \gg \frac{I}{m\omega C}$ и $\frac{I}{m\omega C} \ll R_d$.

2.2. Экспериментальное исследование емкостного фильтра:

а) собрать схему по рис. 1. Установить заданное преподавателем значение сопротивления нагрузки R_d . В качестве вольтметра постоянного напряжения использовать прибор PV1. Подключить входы осциллографа. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа наблюдать осциллограмму выпрямленного напряжения u_d ;

б) снять осциллограмму выпрямленного напряжения u_d , определить коэффициент пульсаций согласно рис. 2. (не забудьте определить масштаб по

напряжению): $q = \frac{U_{n(1)m}}{U_d} \approx \frac{\Delta U_n}{2U_d}$, где $U_{n(1)m}$ – амплитуда первой гармоники пульсаций;

в) сравнить измеренный коэффициент пульсаций с рассчитанным.

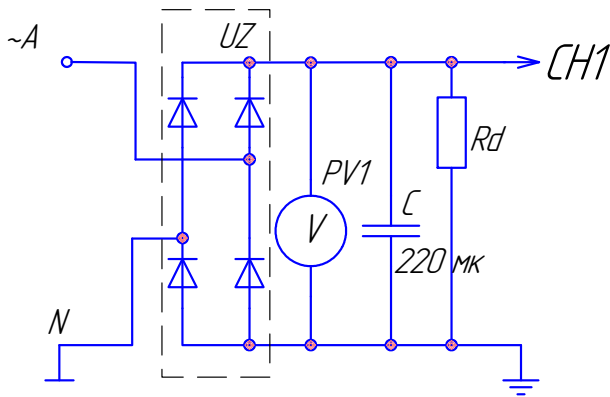


Рис. 1

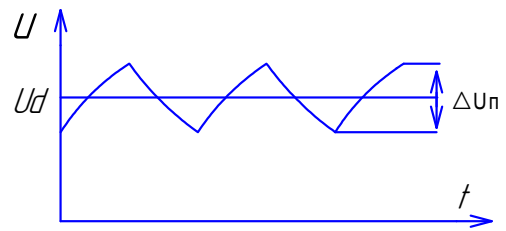


Рис. 2

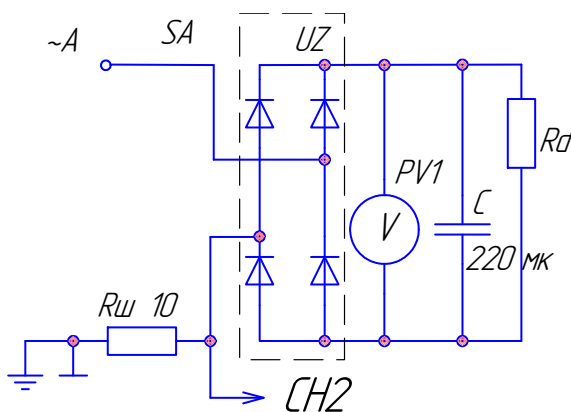


Рис. 3

г) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (68; 150; 330; 680) снять зависимость коэффициента пульсаций от сопротивления нагрузки $U_d = f(R_d)$.

д) включить в цепь питания шунт в соответствии с рис. 3. К шунту подключить вход осциллографа. Включить и выключить тумблер питания несколько раз. Заметить бросок тока при включении. Повторить опыт при отключенном конденсаторе.

2.3. Экспериментальное исследование индуктивного фильтра:

а) собрать схему по рис. 4. Включить один или два дросселя последовательно. Установить заданное значение сопротивления нагрузки R_n . На экране осциллографа наблюдать осциллограммы напряжений на входе и выходе фильтра;

б) снять осциллограммы напряжений на входе и выходе фильтра, определить коэффициенты пульсаций q_1 и q (согласно рис. 2) и коэффициент сглаживания s : $s = \frac{q_1}{q}$;

в) сравнить измеренные коэффициенты пульсаций и сглаживания с рассчитанными;

г) изменяя сопротивление нагрузки (68; 150; 330; 680), снять зависимость коэффициента пульсаций от сопротивления нагрузки $U_d = f(R_d)$.

2.4. Экспериментальное исследование Г-образного фильтра:

а) собрать схему по рис. 5. Включить один или два дросселя последовательно. Установить заданное значение сопротивления нагрузки R_n . В

качестве вольтметра использовать мультиметр PV. Подключить входы осциллографа;

б) снять осциллограммы напряжений на входе и выходе фильтра, определить коэффициенты пульсаций (согласно рис. 2) и коэффициент сглаживания;

в) сравнить измеренные коэффициенты пульсаций и сглаживания с рассчитанными.

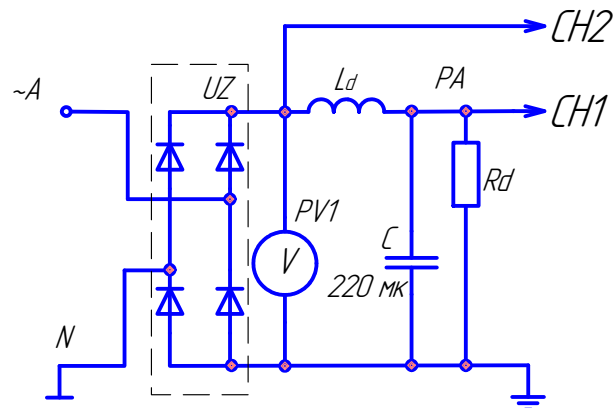


Рис. 5

г) дискретно изменяя сопротивление нагрузки (68; 150; 330; 680), снять зависимость коэффициента пульсаций от сопротивления нагрузки $U_d = f(R_d)$.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; сравнить результаты опытов;
- г) обработанные осциллограммы;
- д) выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Каково назначение фильтров в преобразовательной технике?
2. Принцип действия, преимущества, недостатки и область применения емкостных фильтров.
3. Принцип действия, преимущества, недостатки и область применения индуктивных фильтров.
4. Принцип действия, преимущества, недостатки и область применения Г-образных фильтров.
5. Как и почему влияет конденсатор фильтра на форму анодного тока?
6. Как и почему влияет дроссель фильтра на форму анодного тока?

Работа № 3-17. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

1. Цель работы

Исследование параметров и характеристик параметрических стабилизаторов постоянного напряжения.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Стабилитрон 4,7 В	1
Потенциометр 2,2 кОм	1
Потенциометр 150 Ом	1
Резистор 150 Ом	1

2. Задание и методические указания

2.1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Диоды», «Стабилизаторы» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) для идеализированной ВАХ стабилитрона построить линию нагрузки, если напряжение стабилизации стабилитрона $U_{cm} = 6,8\text{В}$, его дифференциальное сопротивление r_d на участке стабилизации равно нулю, напряжение питания U_{Π} задается преподавателем. Определить ток I_b через балластный резистор;

2.2. Экспериментальное исследование параметрического стабилизатора при изменении питающего напряжения при отсутствии нагрузки:

а) собрать схему параметрического стабилизатора напряжения (рис. 1). Для измерения анодного тока включить цифровой амперметр в режим постоянного тока. Для измерения напряжений на входе и выходе стабилизатора включить вольтметр PV1 и мультиметр PV2.

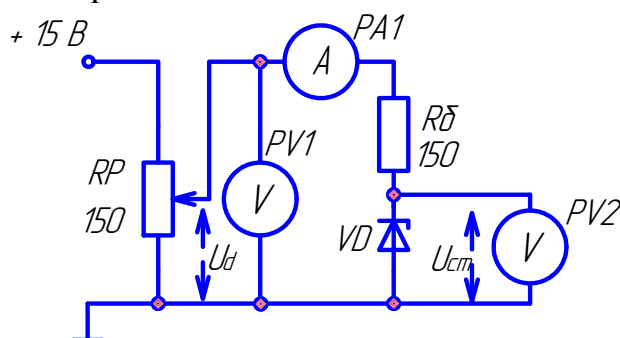


Рис. 1

б) снять зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания $U_{cm} = f(U_d)$. Для этого, изменяя потенциометром напряжение питания U_d на входе стабилизатора, измерять соответствующее ему выходное напряжение U_{cm} . Особенно тщательно отметить напряжение питания, при котором начинается стабилизация. Одновременно измерять ток I_d , потребляемый стабилизатором. Результаты измерений занести в таблицу, по которой построить зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания $U_{cm} = f(U_d)$; Определить напряжение стабилизации стабилизатора U_{cm} .

в) определить коэффициент стабилизации стабилизатора K_{cm} на участке стабилизации:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_{cm}}.$$

2.3. Экспериментальное исследование параметрического стабилизатора при изменении нагрузки:

а) подключить на выход параметрического стабилизатора напряжения изменяющуюся нагрузку $RP2$ (рис. 2). Для измерения тока нагрузки I_n включить цифровой амперметр $PA2$;

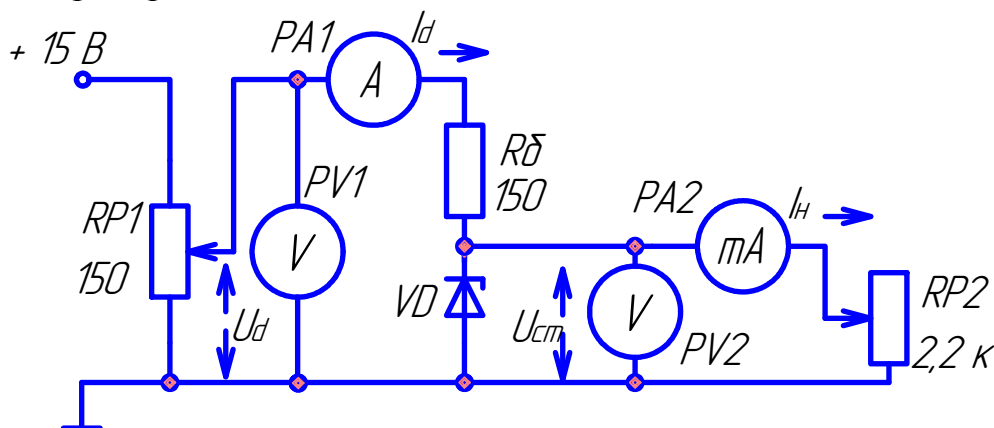


Рис. 2

б) снять зависимость выходного напряжения от тока нагрузки. При регулировании сопротивления нагрузки, потенциометром $RP1$ поддерживать постоянным напряжение питания U_d на входе стабилизатора, равным 10 В. Особенно тщательно отметить ток нагрузки I_{nmax} , при котором прекращается стабилизация U_{cm} . Результаты измерений занести в таблицу, по которой построить зависимость выходного напряжения от тока нагрузки: $U_{cm} = f(I_n)$;

в) определить выходное сопротивление $R_{вых}$ на участке стабилизации и сравнить его с определенным в п.2.2.

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_n} = \left| \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_n} \right|.$$

2.4. Экспериментальное исследование параметрического стабилизатора при изменении питающего напряжения при наличии нагрузки:

а) в схеме рис. 2 установить ток нагрузки равным половине максимально-допустимого I_{nmax} , определенного в п. 2.3.

б) снять зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания $U_{cm} = f(U_d)$. Для этого, изменяя потенциометром напряжение питания U_d на входе стабилизатора, измерять соответствующее ему выходное напряжение U_{cm} . Особенно тщательно отметить напряжение питания U_d , при котором начинается стабилизация. Одновременно измерять ток, потребляемый стабилизатором. Результаты измерений занести в таблицу, по которой построить зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания $U_{cm} = f(U_d)$; зависимость нанести на тот же график, что и в п.2.2; обратить внимание на различия характеристик и объяснить их.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе; в выводах обязательно ответить на контрольные вопросы 5, 6.

4. Контрольные вопросы

1. Где рабочий участок на ВАХ стабилизатора?
2. Как работает параметрический стабилизатор напряжения?
3. Для чего служит балластный резистор?
4. Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при повышении температуры?
5. При каком минимальном напряжении на входе стабилизатора еще возможна стабилизация напряжения? От чего оно зависит?
6. От каких параметров и как зависит качество стабилизации напряжения?

Работа № 3-18. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

1. Цель работы

Ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением самовосстанавливающегося предохранителя.

Перечень минимодулей

Наименование минимодуля	Количество
Самовосстанавливающийся предохранитель	1
Потенциометр 150 Ом	1
Резистор 100 Ом	1
Резистор 150 Ом	1
Резистор 1,5 кОм	1

2. Краткие теоретические сведения

Терморезистор (от греч. *thérme* — тепло, жар; от лат. *resisto* — сопротивляюсь), **термистор** — полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление которого существенно убывает или возрастает с ростом температуры. Для терморезистора характерны большой температурный коэффициент сопротивления (ТКС) (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени. Терморезистор изготавливают в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок преимущественно методами порошковой металлургии; их размеры могут варьироваться в пределах от 1—10 мкм до 1—2 см. Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния.

Различают терморезисторы с отрицательным и положительным ТКС. Вольт-амперная характеристика терморезистора с положительным ТКС приведена на рис. 1.

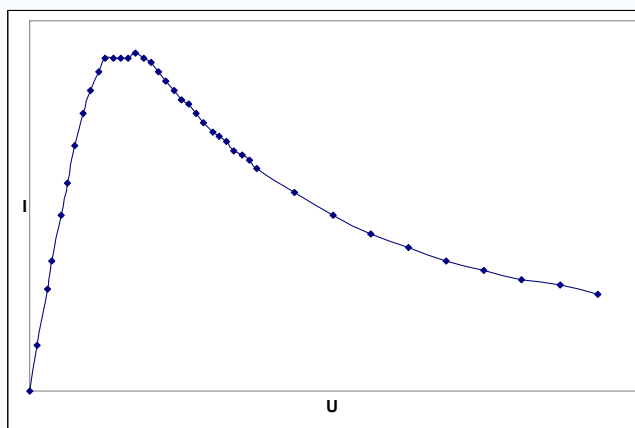


Рис. 1

Режим работы терморезисторов зависит от того, на каком участке статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) выбрана рабочая точка. Терморезисторы с рабочей точкой на начальном (линейном) участке ВАХ используются для измерения и контроля температуры и компенсации

температурных изменений параметров электрической цепей и электронных приборов. Терморезисторы с рабочей точкой на нисходящем участке ВАХ (с отрицательным сопротивлением) применяются в качестве пусковых реле, реле времени, измерителей мощности электро-магнитного излучения на СВЧ, стабилизаторов, температуры, напряжения и т.д. Примером терморезистора с положительным ТКС является самовосстанавливающийся предохранитель.

Самовосстанавливающиеся предохранители - предназначены для защиты электронных узлов от перегрузки по току и перегрева. Устройство представляет собой резистор с положительным температурным коэффициентом сопротивления, изготовленный из специального полимерного материала. Принцип действия основан на свойстве резко увеличивать свое сопротивление под воздействием проходящего тока или температуры окружающей среды и автоматически восстанавливать свои первоначальные свойства после устранения причин срабатывания.

В работе исследуется самовосстанавливающийся предохранитель, параметры которого приведены в табл. 1, а условное графическое обозначение на принципиальных электрических схемах – на рис. 2.

Таблица 1

Тип самовосстанавливающегося предохранителя	RXE005
Рабочий ток, который не изменяет характеристик предохранителя I_n , А	0,05
Максимальное сопротивление в открытом состоянии $R_{\text{макс}}$, Ом	11,1
Максимальное рабочее напряжение U_{max} , В	60

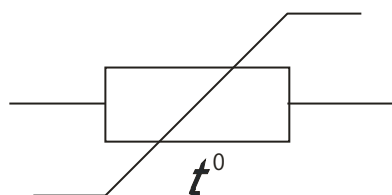


Рис. 2

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать схему для снятия вольтамперной характеристики самовосстанавливающегося предохранителя (рис. 3). В качестве вольтметра PV1 использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В. Для измерения тока использовать цифровой амперметр в режиме измерения постоянного тока (тумблер «=I/~I» установить в положение «=I»). Показать схему для проверки преподавателю.

3.2.1. Снять вольтамперную характеристику самовосстанавливающегося предохранителя $I=f(U)$. Включить тумблер SA3 источника питания. Изменяя напряжение U с помощью потенциометра $RP1$, снять характеристику. На начальном участке (до 1,5 В) желательно снять 5-10 точек с примерным шагом 0,1...0,2 В, на участке выше 2 В снимать данные примерно через 1 В. Экспериментальные результаты записать в табл. 2. Выключить тумблер «Питание». Построить полученную экспериментальную характеристику.

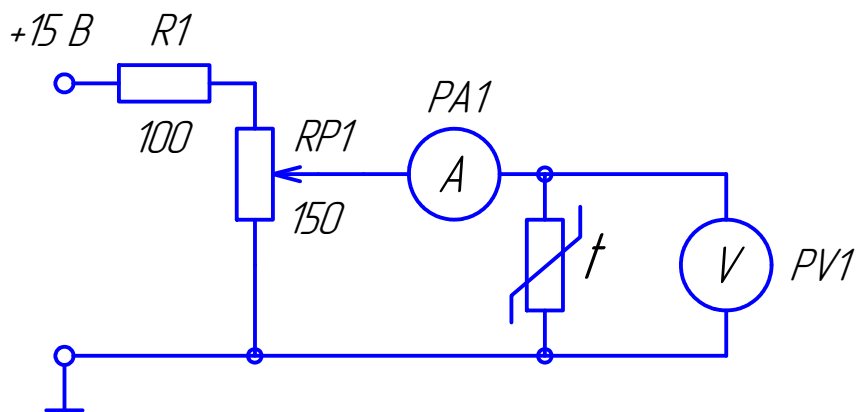


Рис. 3

Таблица 2

$U, В$	0						
$I, мА$							

3.2.2. По полученным экспериментальным характеристикам определить максимальное сопротивление в открытом состоянии R_{\max} при I_n .

3.3. Собрать схему для экспериментального исследования работы самовосстанавливающегося предохранителя при перегрузке (рис. 4). В качестве вольтметра PV1 использовать стрелочный прибор на 15 В или мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В. Для измерения тока использовать цифровой амперметр в режиме измерения постоянного тока. Показать схему для проверки преподавателю.

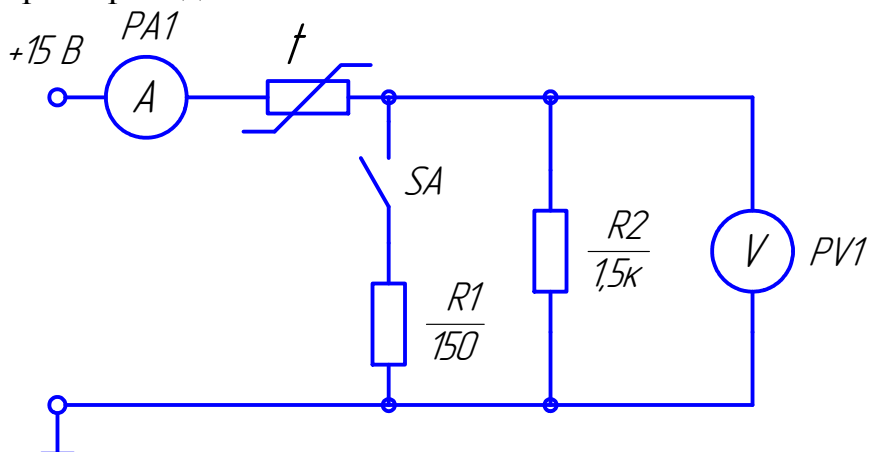


Рис. 4

3.3.1. Экспериментальное исследование работы самовосстанавливающегося предохранителя при перегрузке. Включить тумблер SA3 источника питания. Записать значения тока и напряжения в цепи при разомкнутом положении (0) переключателя SA. Переключить SA в положение «1». Наблюдать за током и напряжением в течении 20 секунд. Записать значения тока и напряжения. Выключить тумблер «Питание». Построить полученную экспериментальную характеристику.

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы проведенных экспериментов;
- в) таблицы с результатами эксперимента и осциллограммы;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) осциллограммы;
- е) выводы.

5. Контрольные вопросы

- 8. Какие разновидности терморезисторов вы знаете?
- 9. Каковы основные области применения терморезисторов?
- 10. Почему меняется сопротивление терморезистора при изменении температуры?
- 11. Как выглядят вольтамперные характеристики терморезисторов с отрицательным и положительным ТКС?