

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Э.М. Пинт

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам
по направлению подготовки 27.03.01
«Стандартизация и метрология»

Пенза 2016

УДК 621.537

ББК 312

ПЗ2

Рекомендовано Редсоветом университета
Рецензент – кандидат технических наук, доцент
А. С. Ширшиков (ПГУАС)

Пинт Э.М.

ПЗ2 Электротехника и электроника: учеб.-метод. пособие к лабораторным работам по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология» / Э.М. Пинт. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 136 с.

Приведены методические рекомендации и порядок выполнения лабораторных работ по курсу «Электротехника и электроника», даны контрольные вопросы.

Подготовлено на кафедре «Механизация и автоматизация производства» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология», при изучении курса «Электротехника и электроника».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2016

© Пинт Э.М., 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью учебно-методического пособия к лабораторным работам по курсу «Электротехника и электроника» является подготовка студентов к качественному выполнению лабораторных работ, закрепляющих теоретическую часть курса и формирующих у студентов определённые практические навыки.

Пособие подготовлено в соответствии с программой курса «Электротехника и электроника» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология», изучающих дисциплину «Электротехника и электроника», относящуюся к базовой части профессионального цикла.

Изучение дисциплины «Общая электротехника и электроника» способствует формированию некоторых профессиональных компетенций, предусмотренных Федеральными государственными образовательными стандартами высшего по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология».

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- овладение способностью принимать участие в моделировании процессов и средств измерений, испытаний и контроля с использованием стандартных пакетов и средств автоматизированного проектирования;

- овладение способностью проводить эксперименты по заданным методикам с обработкой и анализом результатов, составлять описания проводимых исследований и подготавливать данные для составления научных обзоров и публикаций;

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

з н а т ь :

- основные фундаментальные понятия и законы современной электроники и электротехники;

- построение, принцип действия, характеристики и параметры электрических цепей, электронных приборов и электротехнических устройств;

у м е т ь :

- применять современные математические методы в прикладных задачах профессиональной деятельности;

в л а д е т ь :

- методологией определения параметров электротехнических и электронных устройств;

- методикой расчета схем электротехнических и электронных устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение студентом лабораторных работ включает следующие этапы:

1. Самостоятельная подготовка. Предусматривает повторение теоретического материала, изложенного в лекции (учебнике); ознакомление с рекомендованной к данной лабораторной работе литературой; в индивидуальной тетради должен быть заготовлен следующий материал:

- наименование лабораторной работы и учебная цель;
- электрическая схема сборки и проведения экспериментов;
- порядок выполнения работы;
- таблицы заданных, измеряемых и расчетных параметров;
- расчетные формулы.

2. Выполнение лабораторной работы. Осуществляется индивидуально или в составе группы студентов в лаборатории кафедры под руководством преподавателя и лаборанта. Следует иметь в виду, что **включение питания при проведении экспериментов производится только с разрешения преподавателя (лаборанта) после проверки схемы сборки.** По окончании работы выключается питание установки. Результаты измерений в виде таблиц представляются преподавателю для подтверждения правильности выполнения лабораторной работы. После утверждения результатов схема разбирается и рабочее место приводится в порядок.

3. Обработка результатов исследований и составление отчета.

По итогам работы этот этап выполняется во внеурочное время.

Отчет должен быть написан чернилами, четко и аккуратно, иметь титульный лист установленного образца. Содержание отчета:

- наименование и дата выполнения работы;
- цель работы;
- электрическая схема (схемы), вычерченная с соблюдением размеров электрических элементов в соответствии с требованиями ГОСТ и ЕСКД. Подрисуночный текст обязателен;

- перечень используемых источников питания, электрических элементов с указанием их параметров, измерительных приборов. Для электро-механических измерительных приборов указываются наименование прибора, его заводской номер и год выпуска, класс точности, предел измерения и цена деления шкалы. Для цифровых электроизмерительных приборов указывается абсолютная погрешность, которая берется из паспортных данных. Для электрических машин и трансформаторов приводятся данные паспортного щитка, установленного на машине (трансформаторе);

– таблицы с результатами измерений и вычислений. Единицы измерений должны соответствовать Международной системе единиц (СИ). Каждая таблица должна иметь наименование и содержать результаты измерений и вычислений, приведённые к единому порядку точности по исследуемому параметру;

– расчетные формулы, используемые при обработке результатов экспериментов;

– графики и векторные диаграммы, которые должны быть построены на миллиметровой или клетчатой бумаге. Следует обратить внимание на правильный выбор масштаба, чтобы не исказить физическую сущность процесса в исследуемой схеме и обеспечить необходимую точность и наглядность его представления;

– выводы по работе. В выводах, написанных в третьем лице множественного числа, должны быть отражены достижение цели работы, согласование результатов экспериментов с теоретическими положениями, оценка погрешностей результатов измерений.

4. Защита отчета. Осуществляется лично студентом при представлении преподавателю полностью оформленного отчета. При этом необходимо знать наименование лабораторной работы, физическую сущность исследуемых процессов, согласование полученных в работе результатов с основными теоретическими положениями, ответы на все контрольные вопросы по данной лабораторной работе. Необходимо также самостоятельно собирать электрическую схему по данной работе и при необходимости повторить тот или иной эксперимент с получением определенных результатов измерения параметров электрической цепи или характеристик исследуемой электрической установки.

1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Краткие сведения о лабораторном стенде «Уралочка»

Стенд «Уралочка» с набором комплектующих блоков и соединительных проводов предназначен для исследования процессов в цепях постоянного и переменного тока. На лицевой панели стенда размещены:

1. Три мультиметра ВР-11А – цифровые комбинированные электроизмерительные приборы с гнездами «+» и «-» для включения их в измерительные цепи.

2. Автоматический выключатель QF2 с контрольным светодиодом УД4"30У" (рис. 1) для включения и отключения постоянного тока напряжением 30 В к выходным гнездам «+» и «-».

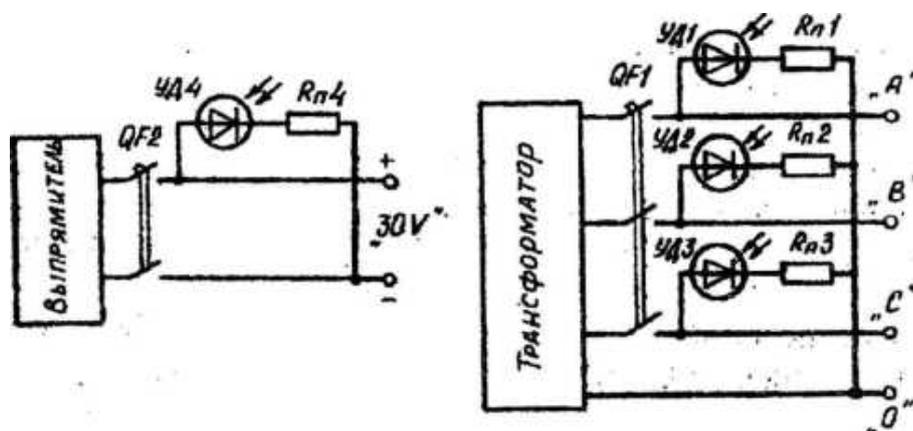


Рис. 1. Автоматические выключатели стенда «Уралочка»

3. Автоматический выключатель QF1 с тремя светодиодами УД1...УД3 в фазах «А», «В» и «С» для включения и отключения трехфазного напряжения к гнездам «А», «В», «С» и «О».

4. Потенциометр R_n - 0-200 Ом – переменное сопротивление для плавного изменения нагрузки потребителя.

5. Тумблер «ВКЛ» для включения и отключения мультиметров в ходе измерения электрических параметров.

6. Предохранитель «Пр1А» на один ампер для защиты мультиметров от перегрузки по току.

7. Лампа осветительная с гнездами подключения – служит в качестве индикатора при поиске неисправностей, возникших в ходе сборки схемы или в процессе работы, а также может быть потребителем электрической энергии.

Комплектующие блоки представляют собой набор резистивных, емкостных и индуктивных элементов, а также коммутационных аппаратов (переключателей). Они совместно с соединительными проводами служат для сборки и исследования простых и разветвленных электрических цепей.

1.2. Общие сведения о мультиметре ВР-11А

Мультиметр ВР-11А представляет собой комбинированный цифровой измерительный прибор и предназначен для измерения напряжения и силы постоянного и переменного тока, сопротивления нагрузки постоянному току, а также частоты переменного тока.

На панели прибора ВР-11А (рис. 2) размещены:

- индикационное табло (1) для высвечивания результата измерения;
- переключатель режимов работы прибора (2) с кнопками:
 - «-V» – для включения прибора в цепи постоянного тока;
 - «~V» – для включения прибора в цепи переменного тока;
 - «kΩ» – для включения прибора в качестве омметра;
 - «kHz*10» – для включения прибора в качестве частотомера;
- переключатель пределов измерения «2мΩ» (3) с кнопками «2», «20», «200» и «2000».

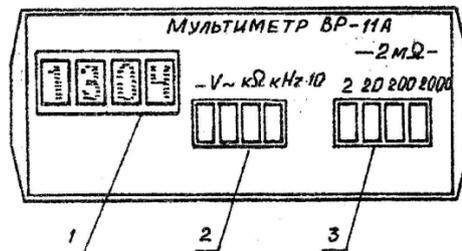


Рис. 2. Передняя панель прибора ВР-11А:
1 – табло; 2 – переключатель режимов; 3 – переключатель пределов

Мультиметр ВР-11А комплектуется двумя токовыми шунтами (рис. 3) для использования его в качестве амперметра: один из них постоянный на 10 А, другой – переменный на 2, 20, 200 и 1000 гаА.

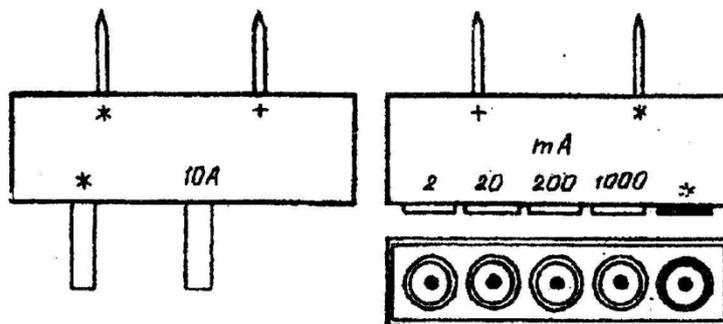


Рис. 3. Шунты ВР-11А для измерения силы тока. Гнезда «*» являются входом, а гнезда «10А», «2, 20, 200, 2000» mA – выходом

Основные технические характеристики мультиметра ВР-11А приведены в таблице.

Основные технические характеристики прибора ВР-11А

Измеряемая величина и размерность	Диапазон измеряемой величины	Пределы измерения на приборе	Относительная погрешность измерения, %
Напряжение постоянного тока, В	$10^{-3} \dots 10^3$	2,20,200,1000*	$\pm 0,5$
Напряжение переменного тока, В $f = *45 \text{ Гц} \dots 1 \text{ кГц}$	$10^{-3} \dots 500$	2,20,200,500*	± 1
Сопротивление постоянному току, кОм	$10^{-3} \dots 2 \cdot 10^3$	2,20,200,2000*	± 1
Сила постоянного тока, мА	$10^{-3} \dots 1 \cdot 10^3$	2,20,200,1000*	± 1
Сила переменного тока, мА $f = 20 \text{ Гц} \dots 10 \text{ кГц}$	$10^{-3} \dots 10 \cdot 10^3$	1000, 10000	$\pm 2,5, \pm 5$
Частота переменного тока, кГц	$0,01 \dots 10^3$	2,20,200,1000*	± 1

Примечание. * – на переключателе пределов «2mΩ» нажата кнопка «2000».

Внимание. Во избежание выхода мультиметра из строя необходимо быть внимательным при манипулировании кнопками переключателя пределов. Следует руководствоваться надписями на лицевой панели прибора; нажимать кнопки переключателя пределов в последовательности «2000», «200», «20», «2» при всех видах измерения; переходить на больший предел, когда прибор индицирует перегрузку (высвечивается буква «п» в старшем разряде), и изменять полярность входного сигнала при мигании знака в старшем разряде. Измерения частоты переменного тока следует производить при напряжении не более 20 В. При измерении напряжения более 500 В недопустима манипуляция кнопками переключателя пределов. Измерение силы тока более 0,5 А должно быть кратковременным (не более 20 с).

1.2.1. Измерение электрических величин мультиметром ВР-11А

Измерение напряжения постоянного и переменного тока:

1. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «-V».
2. Нажать на переключателе пределов «2mΩ» кнопку «200».
3. Подключить мультиметр, соблюдая полярность, к гнездам «+», «-» источника «30V» (рис. 4).
4. Включить автоматический выключатель QF2 «30V» (при этом загорается светодиод УД4 «30V») и снять отсчет на цифровом табло.

5. Выключить автоматический выключатель QF2 «30V», при этом гаснет светодиод «30V».

6. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «~V».

7. Подключить мультиметр к гнездам «А» и «0» трехфазного источника.

8. Включить автоматический выключатель QF1, при этом загораются светодиоды УД1-УД3 фаз «А», «В» и «С». Снять отсчет на цифровом табло величины фазного напряжения U_A .

9. Повторить п. 7 и 8 при измерении фазных напряжений U_B и U_C (гнезда «В»-«0» и «С»-«0»).

Определить среднее значение фазного напряжения источника:

$$U_{\phi} = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C).$$

10. Подключая прибор к гнездам «А» – «В»; «В» – «С»; «С» – «А», определяем среднее значение линейного напряжения источника:

$$U_{л} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}).$$

11. Выключить автоматический выключатель QF1. При этом гаснут светодиоды УД1-УД3.

12. Определить отношение $U_{л}/U_{\phi}$.

Измерение величины сопротивления резисторов:

1. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «kQ», а на переключателе пределов «2мП» – кнопку «2».

2. Подключая прибор параллельно R_1 , R_2 на комплектующем блоке и группам их соединения (см. рис. 4), определяем величину сопротивления по результатам отсчета на цифровом табло.

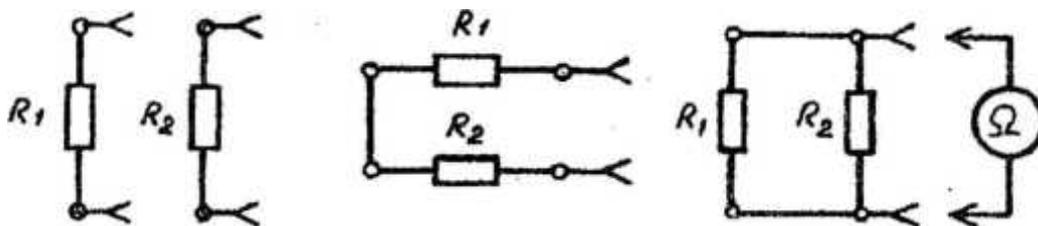


Рис. 4. Измерение сопротивления резистивной нагрузки

3. Проверить соотношения: при последовательном соединении R_1 и R_2 – эквивалентное сопротивление $R_3 = R_1 + R_2$; при параллельном – $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

Измерение силы тока:

1. Подключат» ко входу мультиметра токовый шунт (2...1000) mA.

2. Нажать на переключателе режимов работы кнопку « $\sim V$ », а на переключателе пределов « $2m\Omega$ » – кнопку «2».

3. Собрать схему согласно рис. 5 для измерения силы тока и частоты питающего напряжения.

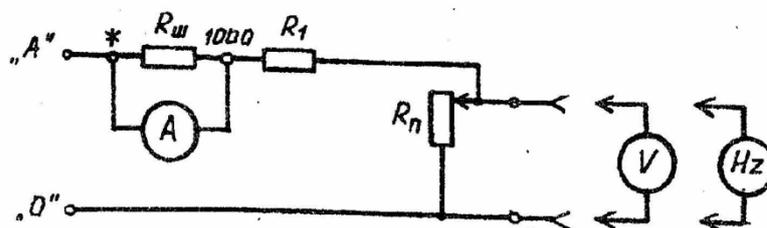


Рис. 5. Схема включения мультиметра ВР-11А

4. Включить автоматический выключатель QF1, при этом загораются светодиоды «А», «В» и «С».

5. Снять отсчет величины тока по цифровому табло при крайних положениях движка потенциометра R_n .

Внимание. При измерении силы тока на запятую, высвечивающуюся в старшем разряде, внимание не обращать. Предел измерения определяется задействованным выходом шунта (гравировка над гнездом).

6. Выключить автоматический выключатель QF1. При этом схему не разбирать.

Измерение частоты переменного тока:

1. Подготовить второй мультиметр ВР-11А для измерения переменного напряжения, подключить его к движку потенциометра $R_n \sim 0-200$ Ом и к гнезду «0» нулевого провода (см. рис. 5).

2. Включить автоматический выключатель QF1 и движком потенциометра R_n установить по вольтметру напряжение менее 20 В.

3. Нажать кнопку «kHz-10» переключателя режима работы мультиметра, используемого в качестве вольтметра, а на переключателе пределов « $2m\Omega$ » – кнопку «2».

4. Снять по цифровому табло отсчет значения частоты переменного тока. Сравнить его со стандартным значением $f = 50$ Гц.

5. Выключить питание и представить результаты измерений преподавателю.

6. Разобрать схему.

1.3. Краткое описание лабораторного стенда «Электрические машины»

Стенд «Электрические машины» (рис. 6) предназначен для исследования режимов работы электрических машин постоянного и переменного тока, а также однофазного трансформатора и включает в себя:

- электрическую машину постоянного тока (3);
- трехфазный асинхронный двигатель с КЗ-ротором (2);
- лабораторный стол (1).

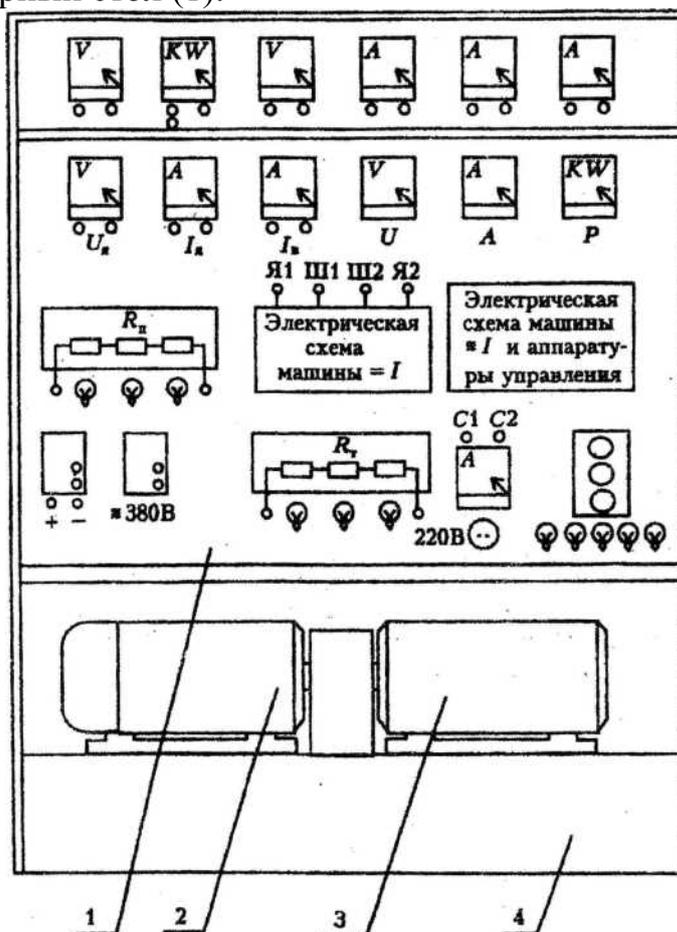


Рис. 6. Лабораторный стенд «электрические машины»

Электрические машины установлены на бетонном фундаменте (4), а их вращающиеся части механически жестко связаны друг с другом. Последнее обеспечивает возможность проводить исследования режимов работы машины постоянного или переменного тока, при этом вторая машина является нагрузкой. Так, в силу обратимости электрических машин при исследовании трехфазного асинхронного двигателя его нагрузкой будет генератор постоянного тока, а при исследовании двигателя постоянного

тока – электромашинный тормоз в виде трехфазной асинхронной машины с КЗ-ротором.

На лабораторном столе размещены (сверху вниз и слева направо):

1. Панель электромеханических измерительных приборов для исследования режимов работы однофазного трансформатора.

2. Панель электромеханических измерительных приборов для исследования режимов работы электрических машин постоянного и переменного тока.

3. Трехступенчатый пусковой реостат R_n с тремя однополюсными выключателями для защиты якорной цепи двигателя постоянного тока от перегрузки по пусковому току и плавного вывода его на номинальный режим работы.

4. Электрическая схема машины постоянного тока с выводами якорной цепи (Я1, Я2) и цепи возбуждения (Ш1, Ш2).

5. Электрическая схема трехфазной асинхронной машины и принципиальная электрическая схема системы управления пуском, торможением и реверсом машины.

6. Два автоматических выключателя для включения постоянного (клеммы «+» и «-») и трехфазного (-380 В) напряжения на лабораторном стенде.

7. Трехсекционный тормозной реостат R_T с тремя однополюсными выключателями для регулирования нагрузки асинхронного двигателя, работающего в режиме электромашинного тормоза.

8. Электрическая розетка «220В» для подачи питания на однофазный трансформатор и включения стробоскопического тахометра при измерениях частоты вращения валов электрических машин.

9. Кнопочная станция для управления работой трехфазного асинхронного двигателя.

10. Пять однополюсных выключателей для имитации возможных неисправностей в цепях системы управления трехфазным асинхронным двигателем.

Контрольные вопросы

1. Что включает в себя этап самостоятельной подготовки студента к лабораторным занятиям?

2. Содержание отчета по лабораторной работе.

3. Как изображаются на принципиальной электрической схеме следующие элементы: резистор, выключатель, автоматический трехполюсный выключатель, конденсатор, катушка индуктивности, измерительный прибор, трехфазный асинхронный двигатель с КЗ-ротором? Их размеры.

4. Назначение элементов управления на лицевой панели стенда «Уралочка».

5. Как подготовить мультиметр ВР-11А к измерению силы переменного тока до 1 А?

6. Как измерить мультиметром ВР-11А величину фазного напряжения источника переменного тока?

7. Как измерить мультиметром ВР-11А величину сопротивления делителя напряжений на комплектующем блоке?

8. Назначение приборов контроля и элементов управления на лицевой панели лабораторного стенда «Электрические машины».

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Целью работы является приобретение навыков:

- в сборке электрических схем на лабораторных стендах и пользовании цифровыми и электромеханическими измерительными приборами при измерениях электрических величин;
- в обработке результатов измерений и оценке полученной при этом погрешности.

1. Теоретические сведения

Погрешности измерений

Измерением какой-либо физической величины называется операция, в результате которой становится известно, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за эталон.

На практике используются измерительные приборы, которые тем или иным образом сверены с эталоном.

Различают прямые и косвенные измерения.

Прямым называется измерение, в котором значение интересующей нас величины получается непосредственно из отсчета по измерительному прибору.

При косвенном измерении результат измерения вычисляется как функция одной или нескольких непосредственно измеряемых величин.

Измерения любой физической величины сопровождаются погрешностями измерения – отклонениями результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Численно погрешности измерения выражаются абсолютными и относительными погрешностями. Пусть x – истинное значение измеряемой величины, а x_i – значение, полученное при n -м измерении (наблюдении). Тогда разность $x - x_i = \Delta x_i$ будет называться **абсолютной погрешностью** i -го измерения. В результате имеем $x = x_i \pm \Delta x_i$, т.е. **численное значение полученной из опыта физической величины должно обязательно сопровождаться указанием величины возможной погрешности**. Поэтому в задачу измерений входит не только нахождение значения самой величины, но и оценка допущенной при измерениях погрешности.

Качество результата измерения характеризуется не абсолютной погрешностью Δx_i , а ее отношением к измеряемой величине x или x_i , которое называется относительной погрешностью δ_{xi} .

$$\delta_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x} \cdot 100\% \text{ или } \delta_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x_i} \cdot 100\%.$$

Погрешности измерения возникают вследствие несовершенства метода измерения, ограниченной точности средств измерения, индивидуальных особенностей экспериментатора.

В первом случае они называются **методическими** и возникают вследствие недостаточной разработанности теории явлений, положенных в основу метода измерения, неточности соотношений, используемых для нахождения измеряемой величины, и др.

Погрешности средств измерения называются **приборными** или **инструментальными**. Это погрешности, допущенные при изготовлении прибора и градуировке шкалы, неучете влияния температурных, электрических и магнитных полей и т.п. По способу выражения погрешности средств измерения подразделяются на абсолютные $\Delta x_i = x - x_i$, относительные

$$\delta_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x_i} \cdot 100\%, \text{ и приведенные } \gamma_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x_N} \cdot 100\%, \text{ где } x_N - \text{нормирующее}$$

значение, в качестве которого принимают для большей части электроизмерительных приборов верхний предел рабочей части шкалы.

Обобщенной характеристикой средств измерения, отражающей уровень их точности, является **класс точности** – это приведенная погрешность прибора, наносимая на шкале. В этом случае абсолютная погрешность прибора или погрешность градуировки легко определяется как

$$\Delta x = \Delta x_{\text{град}} = \gamma_x \frac{x_N}{100},$$

где γ_x – класс точности прибора.

Для цифровых измерительных приборов, например для мультиметра ВР-11А, значение абсолютной погрешности определяется по паспортным данным на прибор.

Индивидуальные особенности экспериментатора при снятии отсчета по градуировочной шкале прибора приводят к субъективным погрешностям, которые могут быть оценены **погрешностью** снятия отсчета

$$\Delta x_{\text{отсч}} = (0,1 \dots 0,5)d,$$

где d – цена наименьшего деления рабочей части шкалы измерительного прибора.

Все рассмотренные погрешности содержат систематическую и случайную составляющие.

Систематические погрешности – погрешности, которые при повторении измерений тем же методом в неизменных условиях повторяются, не изменяясь ни по величине, ни по знаку, либо изменяются закономерно. Систематические погрешности устраняются изменением методики измерений или введением поправок на результат измерения ($\pm \varepsilon_x$).

Поправка ε_x берется из паспортных данных на измерительный прибор. Она определяется в измерительной лаборатории путем сравнения его показаний с показаниями образцового прибора, т.е. прибора более высокого класса точности. Такая поверка рабочего прибора осуществляется не менее одного раза в два года. Номер измерительной лаборатории, год и квартал поверки наносятся на защитное стекло шкалы прибора мастичным клеймом.

Случайные погрешности – погрешности, которые при многократных повторениях опыта изменяются нерегулярно, что приводит к разбросу измеряемых значений. Случайные погрешности оцениваются ошибками разброса $\Delta x_{\text{разб}}$.

Учитывая это, **единичные измерения следует считать недопустимыми**. Всякое измерение должно проверяться многократным повторением.

Пусть x_1, x_2, \dots, x_n – значения измеряемой величины при n наблюдениях.

Тогда среднее арифметическое результата измерения будет равно:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

При этом средняя арифметическая погрешность определяется как

$$\Delta x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{\text{ср}} - x_i|.$$

Результат измерения составит: $x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x_{\text{ср}}$. Знак «+» или «-» показывает, что истинное значение измеряемой величины находится в интервале $x_{\text{ср}} - \Delta x_{\text{ср}} \leq x \leq x_{\text{ср}} + \Delta x_{\text{ср}}$, который называется доверительным интервалом или величиной ошибки.

Вероятность P того, что измеряемая величина находится в доверительном интервале, называется **доверительной вероятностью** или **коэффициентом надежности** a_x .

$$P(x_{\text{ср}} - \Delta x_{\text{ср}} \leq x \leq x_{\text{ср}} + \Delta x_{\text{ср}}) = a_x.$$

Точность измерения оценивается средней квадратической погрешностью σ_x :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{\text{ср}} - x_i)^2}.$$

Коэффициент надежности a_x связан со средней квадратической погрешностью σ_x следующими соотношениями: σ_x соответствует

$$a_x = 0,68; 2\sigma_x \rightarrow a_x = 0,95; 3\sigma_x \rightarrow a_x = 0,99.$$

Таким образом, для определения погрешности измерения необходимо определить два числа: величину ошибки (доверительный интервал) и коэффициент надежности a_x .

Методика обработки результатов измерений

Обработка результатов прямых измерений

Полная погрешность прямых измерений оценивается средней абсолютной погрешностью Δx :

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{град}}^2 + \Delta x_{\text{отсч}}^2 + \Delta x_{\text{разб}}^2}.$$

При этом схема обработки результатов прямых измерений сводится к следующей последовательности:

- по классу точности прибора определяется погрешность градуировки

$$\Delta x_{\text{град}} = \gamma_x \frac{x_N}{100};$$

- по цене деления шкалы прибора определяется погрешность снятия отсчета

$$\Delta x_{\text{отсч}} = 0,5d;$$

- из паспортных данных по результатам поверки прибора на основе сравнения его с образцовым прибором берется поправка ε_x со своим знаком «+» или «-»;

- проводятся измерения физической величины x_1, x_2, \dots, x_n и вычисляются

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{и} \quad \Delta x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{\text{ср}} - x_i|;$$

- находится погрешность разброса

$$\Delta x_{\text{разб}} = \begin{cases} \Delta x_{\text{ср}} & \text{при } n \geq 4; \\ 1,5 \Delta x_{\text{ср}} & \text{при } n = 3; \\ 3,0 \Delta x_{\text{ср}} & \text{при } n = 2; \end{cases}$$

– определяется средняя абсолютная погрешность

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{град}}^2 + \Delta x_{\text{отсч}}^2 + \Delta x_{\text{разб}}^2};$$

– находится результат измерения $x = (x_{\text{ср}} \pm \varepsilon_x) \pm \Delta \lambda$.

При проведении единичного измерения $\Delta x_{\text{разб}} = 0$ и средняя абсолютная погрешность при прямом измерении $\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{град}}^2 + \Delta x_{\text{отсч}}^2}$.

Пример 1. Амперметром класса точности 1,5 со шкалой (0-2) А и ценой деления 0,1 А проведено двукратное измерение силы тока в электрической цепи. Получены данные измерений 1,2 и 1,3 А. Определить результат измерения и полученную при этом погрешность, если поправка на прибор равна +0,05А.

Решение:

1. $\Delta I_{\text{град}} = 1,5 \frac{2}{100} = 0,03 \text{ А.}$

2. $\Delta I_{\text{отсч}} = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05 \text{ А.}$

3. $\varepsilon_I = +0,05 \text{ А.}$

4. $I_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(1,2 + 1,3) = 1,25 \text{ А.}$

$$\Delta I_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\{|1,25 - 1,2| + |1,25 - 1,3|\} = 0,05 \text{ А.}$$

5. $\Delta I_{\text{разб}} = 3,0 \cdot I_{\text{ср}} = 3 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ А.}$

6. $\Delta I = \sqrt{0,03^2 + 0,05^2 + 0,15^2} = 0,16 \text{ А.}$

7. $I = (1,25 + 0,05) \pm 0,16 = (1,3 \pm 0,16) \text{ А.}$

Пример 2. Вольтметром класса точности 1,0 со шкалой (0-250) В и ценой деления 5 В измерено напряжение в фазе источника. Полученное значение равно 127 В. Определить результат измерения и полученную при этом погрешность.

Решение:

1. $\Delta U_{\text{град}} = 1 \frac{250}{100} = 2,5 \text{ В.}$

2. $\Delta U_{\text{отсч}} = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ В.}$

3. $\Delta U = \sqrt{2,5^2 + 2,5^2} = 3,5 \text{ В.}$

4. $U = (127 \pm 3,5) \text{ В.}$

Обработка результатов косвенных измерений

Пусть $x=f(\alpha,\beta,\gamma)$, где α,β,γ – независимые переменные, которые определены в результате прямых измерений:

$$\alpha = \alpha_{\text{cp}} \pm \Delta\alpha; \quad \beta = \beta_{\text{cp}} \pm \Delta\beta; \quad \gamma = \gamma_{\text{cp}} \pm \Delta\gamma.$$

Тогда $x_{\text{cp}}=f(\alpha_{\text{cp}},\beta_{\text{cp}},\gamma_{\text{cp}})$, что справедливо для линейных функций и для общего случая при малых погрешностях $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$.

При этом средняя абсолютная погрешность косвенного измерения величины x определится как

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \Delta\alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \beta} \Delta\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \gamma} \Delta\gamma\right)^2},$$

где в скобках приведены абсолютные частные ошибки функции x по аргументам α, β и γ . Значения частных производных вычисляются для значений аргументов $\alpha_{\text{cp}}, \beta_{\text{cp}}$ и γ_{cp} .

Пример 3. Определить активную мощность P методом амперметра и вольтметра (косвенный метод), используя данные примеров 1 и 2.

Решение:

1. $P=UI$;

$$U = U_{\text{cp}} \pm \Delta U = (127 \pm 3,5) \text{ В};$$

$$I = I_{\text{cp}} \pm \Delta I = (1,3 \pm 0,16) \text{ А};$$

$$P_{\text{cp}} = U_{\text{cp}} I_{\text{cp}} = 127 \cdot 1,3 = 165 \text{ Вт}.$$

$$2. P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \Delta I\right)^2} = \sqrt{(I_{\text{cp}} \Delta U)^2 + (U_{\text{cp}} \Delta I)^2} = \\ = \sqrt{(1,3 \cdot 3,5)^2 + (127 \cdot 0,16)^2} = 21 \text{ Вт}.$$

3. $P=(165\pm 21) \text{ Вт}$.

Пример 4. Определить активное сопротивление нагрузки R методом амперметра и вольтметра (косвенный метод), используя данные примеров 1 и 2.

Решение:

1. $R = \frac{U}{I}$;

$$U = U_{\text{cp}} \pm \Delta U = (127 \pm 3,5) \text{ В};$$

$$I = I_{\text{cp}} \pm \Delta I = (1,3 \pm 0,16) \text{ А};$$

$$R_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{cp}}}{I_{\text{cp}}} = 98 \text{ Ом}.$$

$$2. \Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I} \Delta I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{cp}} \Delta U\right)^2 - \left(\frac{U_{cp}}{I_{cp}^2} \Delta I\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{1,3} \cdot 3,5\right)^2 + \left(-\frac{127}{1,3^2} \cdot 0,16\right)^2} = 12 \text{ Ом.}$$

$$R = (98 \pm 12) \text{ Ом.}$$

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему согласно рис. 1.1.

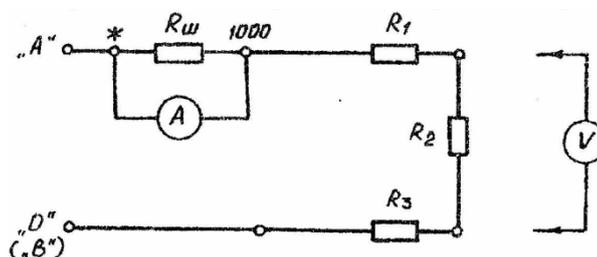


Рис. 1.1. Схема измерения параметров электрической цепи переменного тока

2.2. Измерить фазное и линейное напряжения источника питания, падение напряжений на делителе R_1 , R_2 , R_3 и величину тока. Данные занести в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Результаты измерения параметров электрической цепи
и оценка погрешностей результатов измерений

	Измерено					Вычислено					
	U	U_1	U_2	U_3	I	ΔU	ΔI	R	ΔR	P	ΔP
	В	В	В	В	А	В	А	Ом	Ом	Вт	Вт
$U=U_{\phi}$											
$U=U_{л}$											

Оценить погрешности прямых и косвенных измерений, пользуясь следующими соотношениями:

$$R = \frac{U}{I}; \Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \Delta U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2} \Delta I\right)^2};$$

$$P = UI; \Delta P = \sqrt{(I \Delta U)^2 + (U \Delta I)^2},$$

где абсолютные погрешности приборов ВР-11А ΔU и ΔI взять из паспортных данных (см. таблицу в разд. 1).

2.3. На лабораторном стенде «Электрические машины» (см. рис. 6 в подразд. 1.3) включить автоматический выключатель «-380 В». Пользуясь кнопочной станцией магнитного пускателя, запустить асинхронный двигатель сначала «Вперед», а затем «Назад», фиксируя показания амперметра A , вольтметра V и ваттметра KW . Данные занести в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

Результаты измерения электрических параметров в цепи питания асинхронного двигателя

	Измерено			Вычислено							
	U	I	P	$U_{\text{ср}}$	ΔU	$I_{\text{ср}}$	ΔI	$P_{\text{ср}}^{\text{п}}$	$\Delta P^{\text{п}}$	$P_{\text{ср}}^{\text{к}}$	$\Delta P^{\text{к}}$
	В	А	Вт	В	В	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт
«Вперёд»											
«Назад»											

В н и м а н и е . Реверс осуществлять только после полной остановки ротора двигателя.

2.4. Оценить погрешности измерения электрических параметров в цепях питания асинхронного двигателя, пользуясь следующими соотношениями:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(U_{\text{в}} + U_{\text{н}}); \Delta U = \sqrt{\Delta U_{\text{град}}^2 + \Delta U_{\text{отсч}}^2 + \Delta U_{\text{разб}}^2}; \Delta U_{\text{раз}} = 3\Delta U_{\text{ср}};$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(I_{\text{в}} + I_{\text{н}}); \Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{град}}^2 + \Delta I_{\text{отсч}}^2 + \Delta I_{\text{разб}}^2}; \Delta I_{\text{разб}} = 3\Delta I_{\text{ср}};$$

$$P_{\text{ср}}^{\text{п}} = \frac{1}{2}(P_{\text{в}} + P_{\text{н}}); \Delta P^{\text{п}} = \sqrt{\Delta P_{\text{град}}^2 + \Delta P_{\text{отсч}}^2 + \Delta P_{\text{разб}}^2}; \Delta P_{\text{раз}} = 3\Delta P_{\text{ср}};$$

$$P_{\text{ср}}^{\text{к}} = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} \cos \varphi; \cos \varphi = (0,12 \dots 0,16);$$

$$\Delta P^{\text{к}} = \sqrt{(I_{\text{ср}} \Delta U)^2 + (U_{\text{ср}} \Delta I)^2}.$$

Индексы “в” и “н” соответствуют пуску двигателя “Вперед” и «Назад», “п” и “к” – прямым и косвенным измерениям. Значение $\cos \varphi$ задается преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения называются прямыми, а какие – косвенными?
2. Какие погрешности сопровождают процесс измерения?
3. Какие погрешности характеризуют средства измерения?
4. Что такое класс точности прибора?
5. Последовательность обработки результатов прямых измерений.
6. Как оценивается погрешность косвенного измерения?

Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R-, L-, C-ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: научиться исследовать изменение характера электрической цепи при различных соотношениях реактивных элементов, выявлять условия возникновения в цепи резонанса напряжений и получить практические навыки в построении векторных диаграмм по экспериментальным данным.

1. Основные теоретические сведения

В линейной электрической цепи, параметры которой не зависят от величины и направления тока, под действием синусоидального напряжения устанавливается синусоидальный ток той же частоты.

Мгновенные значения синусоидальных напряжений и токов в общем виде могут быть записаны в виде уравнений

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Здесь U_m, I_m – максимальные или амплитудные значения напряжения и тока; $(\omega t + \psi_u), (\omega t + \psi_i)$ – их фазы, где ω – угловая частота, равная $2\pi f$ ($f=50$ Гц – промышленная частота); ψ_u, ψ_i – начальные фазы (фазы при $t = 0$); t – текущее время.

На практике при оценке действия синусоидального тока пользуются действующими значениями напряжения и тока, которые связаны с амплитудными следующими соотношениями:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m ; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m.$$

Электроизмерительные приборы, измеряющие ток и напряжение, показывают всегда действующие значения измеряемой величины.

Разность начальных фаз между напряжением и током $\psi_u - \psi_i = \varphi$ называют углом сдвига фаз. Угол φ определяет характер нагрузки в электрической цепи.

Любая синусоидальная функция времени в декартовой плоскости OXY может быть условно изображена однозначно соответствующим ей вращающимся радиусом-вектором, длина которого равна амплитудному значению синусоиды, а начальное положение относительно оси OX определяется начальной фазой синусоиды (рис.2.1).

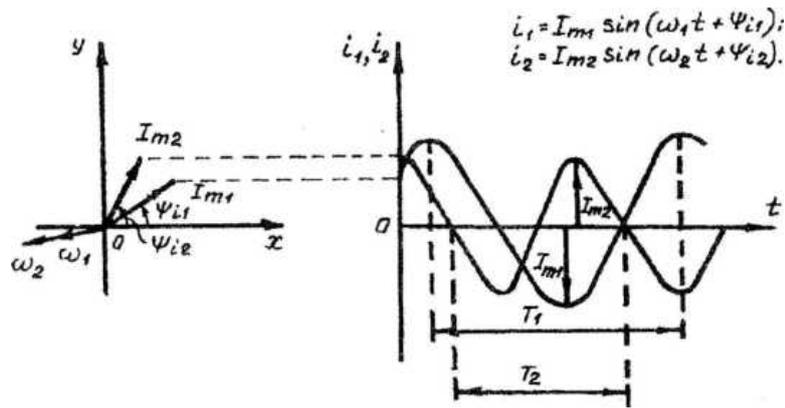


Рис. 2.1. Вращающиеся радиусы-векторы и соответствующие им синусоидальные функции времени

Совокупность радиусов-векторов, изображающих синусоидальные функции времени, называется векторной диаграммой.

Изображение векторных диаграмм в декартовой плоскости отличается простотой построения и хорошей наглядностью, но не обеспечивает в ряде случаев требуемой точности расчетов параметров синусоидальных функций. Повысить точность аналитических расчетов позволяет рассмотрение синусоидальных функций на комплексной плоскости (рис.2.2).

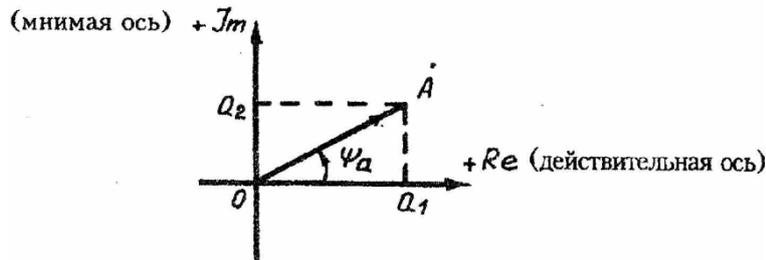


Рис. 2.2. Изображающий вектор на комплексной плоскости

Изображающий вектор A на комплексной плоскости расположен относительно оси действительных чисел под углом ψ_a , равным начальной фазе синусоидальной функции. Длина вектора в выбранном масштабе равна ее амплитудному значению.

Любому вектору A , расположенному на комплексной плоскости, соответствует комплексное число, которое может быть записано в трех формах:

алгебраической $A = a_1 + ja_2$;

тригонометрической $A = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a = A (\cos \psi_a + j \sin \psi_a)$;

показательной $A = A e^{j\psi_a}$.

Все три формы записи равнозначны. Выбор той или иной формы в каждом конкретном случае диктуется удобством осуществления нужной

математической операции: при суммировании удобна алгебраическая форма, при умножении и делении – показательная.

Переход от одной формы к другой осуществляется с помощью следующих соотношений:

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}; \quad \psi_a = \arctg \frac{a_2}{a_1}; \quad a_1 = A \cos \psi_a; \quad a_2 = A \sin \psi_a;$$

здесь a_1 – действительная часть комплексного числа;

a_2 – мнимая часть комплексного числа;

ψ_a – аргумент комплексного числа.

Следует иметь в виду, что аппарат комплексных изображений применим для анализа электрической цепи, в которой действуют источники одной известной угловой частоты ω . Это, как правило, источники промышленной частоты $\omega = 314$ рад/с ($f = 50$ Гц).

Особый интерес представляет сопоставление по амплитуде и фазе тока и напряжения одного и того же элемента цепи. Это сопоставление проводят также с помощью комплексных чисел.

Отношение комплексной амплитуды напряжения к комплексной амплитуде тока называется комплексным сопротивлением:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

Комплекс Z является комплексным числом, а не изображением синусоидальной функции. Тогда закон Ома в комплексной форме будет иметь вид:

$$\dot{U}_m = \underline{Z} \dot{I}_m \quad \text{или} \quad \dot{U} = \underline{Z} \dot{I}.$$

При анализе электрических цепей синусоидального тока в качестве основных элементов принимают резистивный R , емкостный C и индуктивный L элементы, источники ЭДС e и тока i . Сопротивление резистивного элемента R в цепи переменного тока называется **активным**, элемента C – **емкостным**, элемента L – **индуктивным**. Все эти три элемента являются пассивными, т.к. ток и напряжение на них не равны нулю лишь при подключении к ним источника электрической энергии.

В электрической цепи синусоидального тока с R -элементом:

- вектор напряжения U_R совпадает по фазе с вектором тока I , т.е. угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$;

- комплексное сопротивление резистивного элемента является положительным действительным числом, равным активному сопротивлению $\underline{Z} = R$;

- энергетический процесс в цепи характеризуется активной мощностью P , Вт, которую R -элемент потребляет от источника и необратимо преобразует в тепловую энергию $P = UI$.

В электрической цепи синусоидального тока с L -элементом:

- напряжение на индуктивном элементе синусоидально изменяется с той же частотой; вектор напряжения U_L опережает вектор тока I на четверть периода, т.е. угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$;
- комплексное сопротивление резистивного элемента является положительным мнимым числом $\underline{Z} = jX_L = j\omega L$;
- активная мощность индуктивного элемента равна нулю. В цепи происходит периодический обмен энергией между источником и магнитным полем L -элемента. Амплитудное значение мгновенной мощности называется реактивной мощностью $Q_L = UI = X_L I^2$.

В электрической цепи синусоидального тока с C -элементом:

- ток и напряжение также синусоидальны, одинаковой частоты; при этом вектор тока I опережает вектор напряжения U_C на четверть периода, т.е. $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$;
- комплексное сопротивление C -элемента является отрицательным мнимым числом $\underline{Z} = -jX_C = -j \frac{1}{\omega C}$;

• активная мощность C -элемента равна нулю. В цепи происходит периодический обмен энергией между источником и электрическим полем конденсатора. Интенсивность обмена оценивается амплитудным значением мгновенной мощности, которую называют реактивной: $Q_C = UI = X_C I^2$.

В общем случае, когда в последовательной цепи включены R -, L -, C -элементы (рис.2.3,а), эквивалентное комплексное сопротивление цепи \underline{Z} равно сумме комплексных сопротивлений всех последовательно включенных элементов.

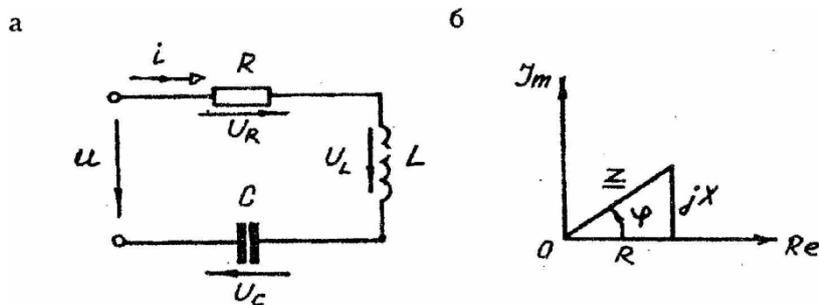


Рис.2.3. Схема цепи с последовательным соединением элементов

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = \dot{I}(R + jX_L - jX_C) = \dot{I}\underline{Z}$$

$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX$; здесь $X = X_L - X_C$ – реактивное сопротивление

Индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления являются арифметическими величинами, зависят только от параметров элементов и угловой частоты: $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Реактивное же сопротивление X – величина

алгебраическая, и его знак зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями. Соотношения между Z , R и X можно определить из треугольника сопротивлений, построенного на комплексной плоскости (рис.2.3,б).

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}; \quad R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi.$$

Фазовые соотношения между напряжением и током в цепи определяются углом сдвига $\varphi = \psi_u - \psi_i = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$ (рис.2.4).

В случае $X_L > X_C$, т.е. $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, угол сдвига фаз $\varphi > 0$, вектор напряжения U опережает вектор тока I и цепь носит активно-индуктивный характер (рис.2.4, а).

В случае $X_C \geq X_L$, т.е. $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, угол сдвига фаз $\varphi < 0$, вектор напряжения U отстает от вектора тока I , и цепь носит активно-емкостный характер (рис.2.4, б).

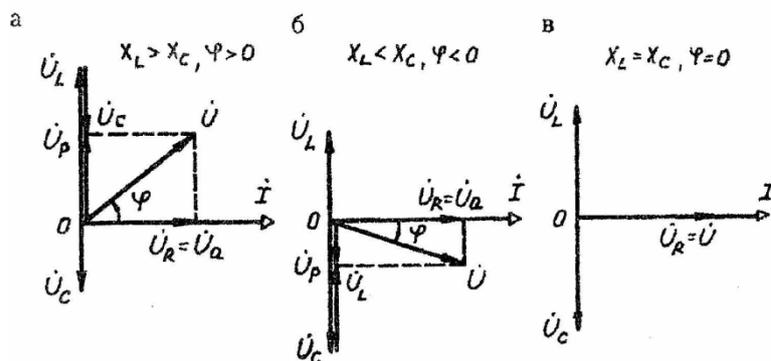


Рис.2.4. Векторные диаграммы цепи с последовательным соединением R -, L -, C -элементов в предположении, что $\psi_i = 0$

И, наконец, возможен третий случай, когда $X_L = X_C$, т.е. $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, угол сдвига фаз $\varphi = 0$, вектор напряжения U совпадает с вектором тока I и цепь носит чисто активный характер. Такой режим в цепи называют **резонансом напряжений**.

При резонансе напряжений $U_L = U_C$, мнимая часть комплексного сопротивления равна нулю, т.е. комплексное сопротивление цепи $\underline{Z} = R$ и ток в цепи достигает своего максимального значения.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему (рис.2.5), используя комплектующие блоки.

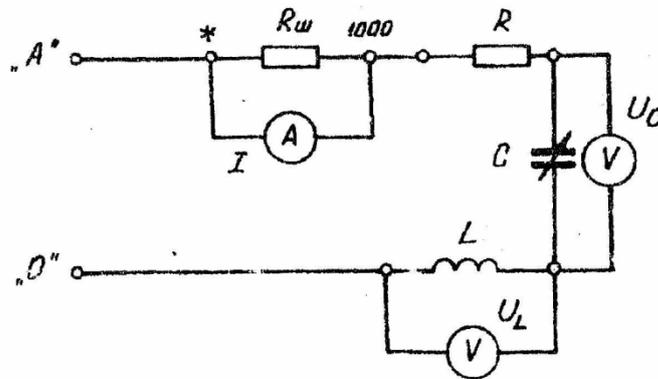


Рис. 2.5. Схема цепи с последовательным соединением R -, C -, L -элементов

Активное сопротивление катушки $R_K < 5$ Ом и ее можно считать чисто индуктивным сопротивлением X_L . В качестве переменной емкости необходимо использовать магазин емкостей, а активное сопротивление выбрать из магазина сопротивлений ($R = 100$ Ом).

2.2. Включить питание и произвести измерения величин тока и падения напряжений на элементах схемы при значениях емкости C 0, 10, 30, 50, 70 и 90 мкФ. Данные занести в табл.2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Результаты измерений и вычислений параметров электрической цепи с последовательным соединением R -, C -, L -элементов при изменении емкости C

Задано		Измерено				Вычислено									
R	C	U	I	U_L	U_C	U_R	L	X_L	X_C	Z	$\cos \varphi$	P	S	S	φ
Ом	мкф	В	А	В	В	В	Гн	Ом	Ом	Ом		Вт	ВА	ВАр	ГРАД

Расчетные формулы для табл. 2.1.

$$U_R = IR; L = \frac{U_L}{2\pi f I}; X_L = 2\pi f L; X_C = \frac{1}{2\pi f C};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; \cos \varphi = \frac{R}{Z} \text{ или } \cos \varphi = \frac{U_R}{U};$$

$$P = I^2 R; S = \frac{P}{\cos \varphi}; Q = S \sin \varphi.$$

2.3. Рассчитать параметры электрической цепи при следующих исходных данных: $R=100$ Ом, $L_{cp}=\frac{1}{5}\sum_{i=1}^5 L_i$ (по данным табл.2.1), $C = 0, 10, 40, 90, \infty$ мкФ, $U=U_{\phi}$. Данные занести в табл.2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Расчетные значения параметров электрической цепи с последовательным соединением R -, C -, L - элементов

C , мкФ	0	10	40	90	∞
$X_C = \frac{1}{314C}$, Ом					
$X_L = 314L_{cp}$, Ом					
$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, Ом					
$I = \frac{U}{Z}$, А					
$U_R = IR$, В					
$U_L = IX_L$, В					
$U_C = IX_C$, В					

2.4. Построить по данным табл.2.1 и 2.2 в общей системе координат графики зависимостей $I=f(C)$, $U_R=f(C)$, $U_L=f(C)$, $U_C=f(C)$, $\varphi=f(C)$ и сравнить сходимость экспериментальных (см. табл.2.1) и расчетных (см. табл. 2.2) результатов (рис. 2.6). По графикам определить значение резонансной емкости $C = C_p$ и сравнить его с расчетным значением $C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{cp}}$.

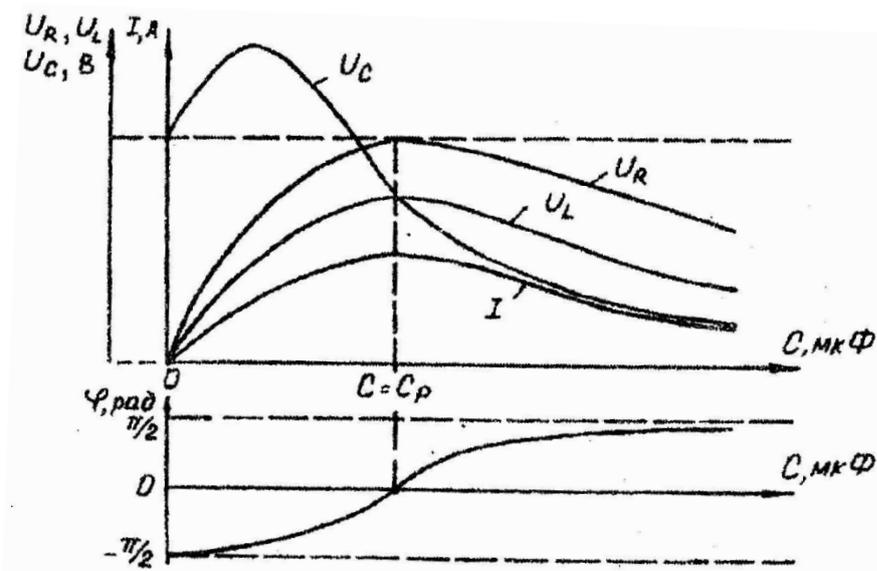


Рис. 2.6. Изменение параметров электрической цепи при изменении емкости C

2.5. Построить в выбранном масштабе векторные диаграммы тока I и напряжений U_R , U_L , U_C и U для трех случаев (см. рис. 2.4): до резонанса, при резонансе и после резонанса напряжений, используя экспериментальные данные (см. табл. 2.1).

Построение векторной диаграммы удобно начинать с вектора тока I , который является одним и тем же для всех элементов цепи.

Векторы напряжений U_R , U_L и U_C ориентированы по отношению к вектору тока в соответствии с фазовыми соотношениями для R -, L - и C -элементов.

Следует обратить внимание на то, что вектор напряжения $U = U_R + U_L + U_C$ при соблюдении масштаба построения для всех рассматриваемых случаев будет иметь одну и ту же величину, равную фазному напряжению источника. Особенно важно заметить, что вблизи резонанса и при резонансе напряжения на реактивных элементах U_L и U_C , находясь в противофазе, могут значительно превысить напряжение источника. Поэтому резонанс при последовательном соединении элементов называют резонансом напряжения.

2.6. Построить в выбранном масштабе на комплексной плоскости треугольники сопротивлений, напряжений и мощностей для одной строки табл. 2.1 до или после резонанса напряжений.

2.7. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Какое значение измеряемой величины показывают электроизмерительные приборы в цепи переменного тока?
2. Что называется углом сдвига фаз и какое влияние он оказывает на характер электрической цепи?
3. Дать характеристику цепи с R - (L - или C -)элементом.
4. Что такое резонанс напряжений и какими параметрами электрической цепи он характеризуется?
5. Начертить в комплексной плоскости треугольник сопротивлений и пояснить его построение.
6. Какой вид имеет векторная диаграмма для активно-индуктивной нагрузки в цепи переменного тока?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R-, L-, C-ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: научиться исследовать состояние и определять параметры электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении приемников электрической энергии, а также выявлять условия возникновения резонанса токов в параллельной цепи реальной катушки и конденсатора; приобрести навыки построения векторных диаграмм состояния цепи по экспериментальным и расчетным данным.

1. Основные теоретические сведения

В линейной электрической цепи при параллельном соединении приемников электрической энергии приложенное синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ вызывает в каждой ветви синусоидальные токи одной и той же частоты. Фазовый сдвиг между напряжением и током определяется характером сопротивления ветви.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух параллельных ветвей (рис.3.1). Здесь R_K – активное сопротивление катушки.

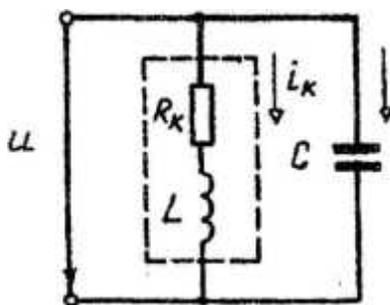


Рис.3.1. Схема цепи с двумя параллельными ветвями

Для узла a согласно первому закону Кирхгофа можно записать $i = i_k + i_c$ или $I = I_k + I_c$. Определим токи в ветвях и общий ток при условии, что начальная фаза напряжения $\psi_u = 0$. Комплексные сопротивления и комплексные проводимости ветвей и всей цепи принимают вид:

$$\underline{Z}_K = R_K + jX_L; \quad \frac{1}{\underline{Z}_K} = Y_K = g_K + jb_L;$$

$$\underline{Z}_C = -jX_C; \quad \frac{1}{\underline{Z}_C} = Y_C = -jb_C;$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_K \underline{Z}_C}{\underline{Z}_K + \underline{Z}_C}; \quad \frac{1}{\underline{Z}} = \underline{Y} = g + jb = \underline{Y}_K + \underline{Y}_C = g_K + j(b_L - b_C).$$

Здесь \dot{Y}_K , \dot{Y}_C и \dot{Y} – комплексные проводимости ветвей и цепи, у которых действительная часть g называется активной проводимостью, а мнимая b – реактивной проводимостью.

Из приведенных выражений видно, что при параллельном соединении ветвей эквивалентная комплексная проводимость \dot{Y} равна сумме комплексных проводимостей ветвей \dot{Y}_K и \dot{Y}_C .

Определим токи в ветвях и в неразветвленной части цепи:

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_K} = \dot{U}\underline{Y}_K = \dot{U}g_K + \dot{U}jb_L = \dot{I}_{к.а} + \dot{I}_{к.р};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_C} = \dot{U}\underline{Y}_C = -\dot{U}jb_C = -\dot{I}_{ср};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \dot{U}\underline{Y} = \dot{U}g + \dot{U}jb = \dot{I}_a + \dot{I}_p = \dot{I}_{к.а} + (\dot{I}_{к.р} - \dot{I}_{ср});$$

Как видно из полученных выражений, комплексные токи в цепи и в ветвях имеют активные ($\dot{I}_{к.а}, \dot{I}_a$) и реактивные ($\dot{I}_{к.р}, \dot{I}_{ср}, \dot{I}_p$) составляющие токов. Такое разделение облегчает анализ фазовых соотношений между током и напряжением при построении векторных диаграмм. При этом возможны следующие случаи:

1) $B_L > b_C, \dot{I}_{к.р} > \dot{I}_{ср}$ – цепь носит активно-индуктивный характер, напряжение опережает ток в цепи на угол φ ;

2) $B_L < b_C, \dot{I}_{к.р} < \dot{I}_{ср}$ – цепь носит активно-емкостный характер, ток опережает напряжение на угол φ ;

3) $B_L = b_C, \dot{I}_{к.р} = \dot{I}_{ср}$ – цепь носит чисто активный характер, ток и напряжение совпадают по фазе ($\varphi = 0$).

Такой режим в параллельной цепи называют **резонансом токов**.

На рис.3.2 приведены векторные диаграммы для рассмотренных случаев при условии, что параметры ветви с катушкой индуктивности и частота источника питания оставались неизменными, а менялась лишь емкость C .

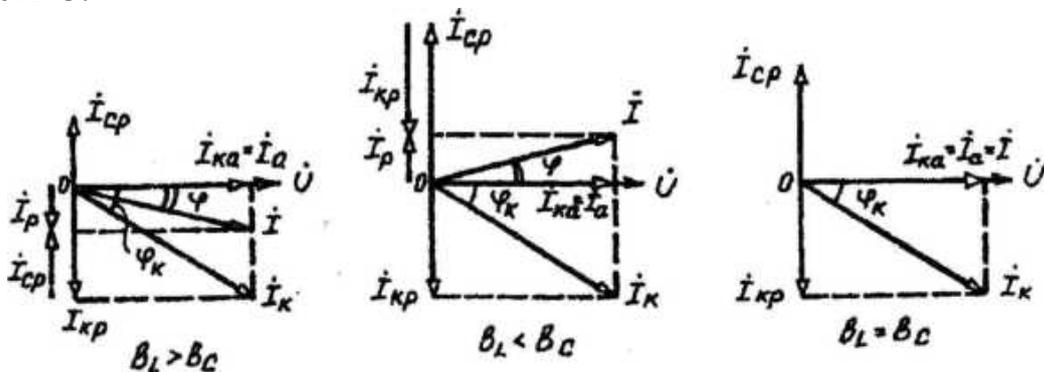


Рис.3.2. Векторные диаграммы синусоидальной цепи с двумя параллельными ветвями

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему согласно рис.3.3, предварительно измерив омметром сопротивление катушки индуктивности R_K .

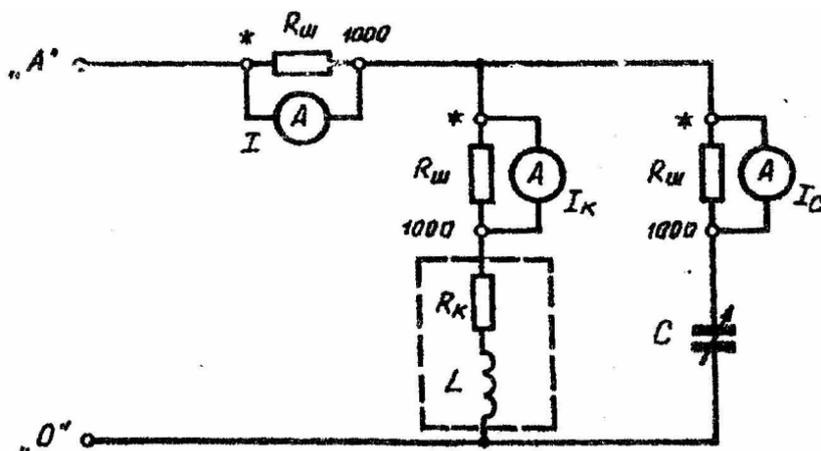


Рис.3.3. Схема сборки цепи параллельного соединения R -, C -, L -элементов

2.2. Включив питание и, изменяя величину емкости C на комплектующем блоке от 0 до 10 мкФ с шагом 1 мкФ, измерить токи в ветвях и в неразветвленном участке цепи. Данные измерений занести в табл.3.1 для дальнейшей обработки.

Т а б л и ц а 3.1

Изменение параметров цепи с параллельным соединением индуктивного и емкостного элементов при изменении емкости C

Задано		Измерено				Вычислено							
R	C	U	I	I_K	I_C	$I_{к.а}$	$I_{к.р}$	I_p	$\cos\varphi$	φ	S	P	Q
Ом	мкФ	В	А	А	А	А	А	А		рад	ВА	Вт	ВАр

2.3. Произвести расчет параметров ветви с индуктивностью

$$Z_K = \frac{U}{I_K}; L = \sqrt{\frac{Z_K^2 - R_K^2}{\omega^2}}; \cos\varphi_K = \frac{R_K}{Z_K}; \sin\varphi_K = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_K},$$

$$I_{к.а} = I_K \cos\varphi_K; I_{к.р} = I_K \sin\varphi_K.$$

2.4. Рассчитать параметры всей цепи.

Так как $I_C = I_{Cp}$, то реактивная составляющая общего тока

$$I_p = I_{к.р} - I_{Cp}, \cos\varphi = \frac{I_{к.а}}{I}; \sin\varphi = \frac{I_p}{I}; S = UI; P = S \cos\varphi;$$

$$Q = S \sin\varphi.$$

2.5. По данным табл.3.1. и результатам расчетов по пп. 2.3 и 2.4 построить:

– графики зависимостей $I=f(C)$, $I_k=f(C)$, $I_c=f(C)$, $\varphi=f(C)$ определить по экспериментальным данным значение емкости $C=C_p$, при которой наступает резонанс токов (рис.3.4);

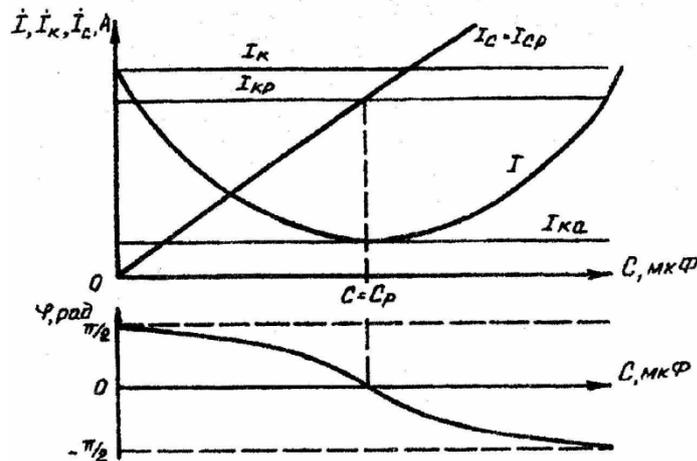


Рис.3.4. Изменение параметров электрической цепи при изменении емкости C

– векторные диаграммы до резонанса, при резонансе и после резонанса токов в цепи (см. рис. 3.2). При этом рекомендуется начинать построение с вектора напряжения U , принимая во внимание, что его начальная фаза $\psi=0$;

– треугольник мощностей для случая, когда параллельная цепь носит активно-индуктивный характер.

2.6. Рассчитать значение резонансной емкости $C=C_p$ из условия $\frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2}$ при $R_C=0$. Сравнить полученный результат с экспериментальными данными.

Контрольные вопросы

1. Что такое проводимость ветви электрической цепи?
2. При каком условии параллельная цепь носит активно-емкостный характер?
3. Условия возникновения резонанса токов в параллельной цепи с L - и C -элементами.
4. Каково соотношение токов в ветвях и неразветвленной части цепи при резонансе в параллельной цепи L - и C -элементов?
5. Пояснить технико-экономическое значение повышения коэффициента мощности.

Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: научиться исследовать основные и аварийные режимы работы трехфазной цепи переменного тока при соединении приемников звездой, определять влияние нейтрального провода в четырехпроводной трехфазной цепи, строить по опытным данным векторные диаграммы токов и напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках в фазах приемников электрической энергии.

1. Основные теоретические сведения

Трехфазная цепь состоит из источника электрической энергии, линии передачи и приемников. Источником является трехфазный генератор, у которого статорная обмотка состоит из трех фаз, сдвинутых относительно друг друга на 120° ($2/3 \pi$). При вращении ротора, представляющего собой электромагнит, в обмотках статора возбуждается ЭДС. Если амплитуды этих ЭДС равны, а сдвиг по фазе равен $2/3 \pi$, такую систему называют **симметричной** (рис.4.1).

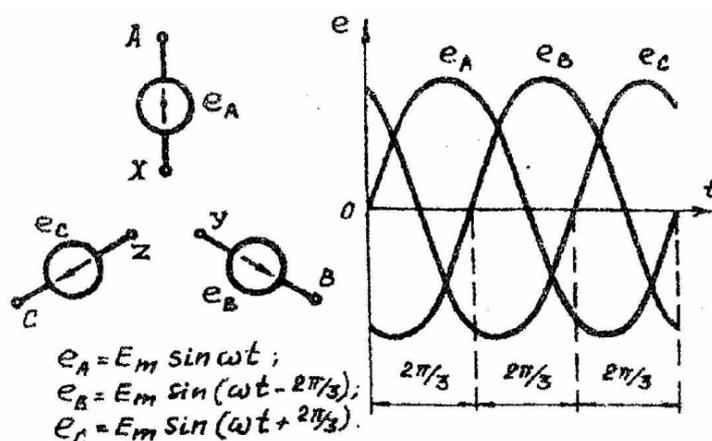


Рис.4.1. Симметричный трехфазный источник
(A, B, C – начала фаз, X, Y, Z – концы фаз)

На практике основными способами соединения фаз трехфазного источника являются связанные системы соединения звездой (рис. 4.2,а), в которой концы фаз X, Y, Z соединяются в один общий узел, называемый нейтралью источника, и треугольником (рис. 4.2,б), где в одну точку соединяются начала и концы соответствующих фаз.

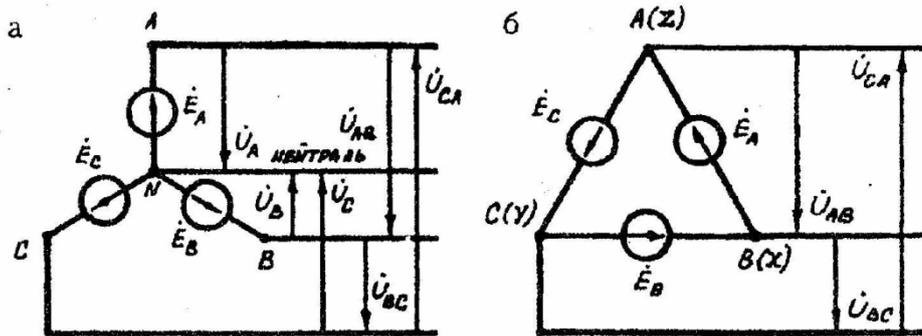


Рис.4.2. Схемы соединения фаз источника звездой и треугольником

Важной особенностью трехфазных цепей является наличие двух напряжений – фазного и линейного. **Фазным** называют напряжение между началом и концом каждой фазы U_A, U_B, U_C , а **линейным** – между началами двух фаз U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . За положительное направление фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз обмоток. Соотношения между линейными и фазными напряжениями трехфазного источника без нарушения симметрии фазных ЭДС определены как $U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$. Поэтому предусмотренные ГОСТом линейные и фазные напряжения для цепей низкого напряжения связаны между собой соотношениями:

$$U_{л} = 660 \text{ В} \rightarrow U_{\phi} = 380 \text{ В}; U_{л} = 380 \text{ В} \rightarrow U_{\phi} = 220 \text{ В};$$

$$U_{л} = 220 \text{ В} \rightarrow U_{\phi} = 127 \text{ В}.$$

Схема соединения фаз источника треугольником (чаще всего вторичные обмотки трехфазного трансформатора) позволяет получить только линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть либо однофазными (осветительные и бытовые электроприборы, однофазные двигатели и др.), либо трехфазными. Например, трехфазный асинхронный двигатель. Приемники могут соединяться звездой или треугольником, при этом начала фаз обозначаются прописными буквами a, b, c , а концы – x, y, z (рис.4.3).

Приемник называется **симметричным** (рис.4.3,а), если комплексные сопротивления фаз равны между собой:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}.$$

Если эти условия не выполняются, то приемники называются **несимметричными**. При этом, если модули $Z_a=Z_b=Z_c$, то трехфазный приемник называют **равномерным** (рис. 4.3, г), если равны фазы $\varphi_a=\varphi_b=\varphi_c$, то **однородным** (рис. 4.3, б, в).

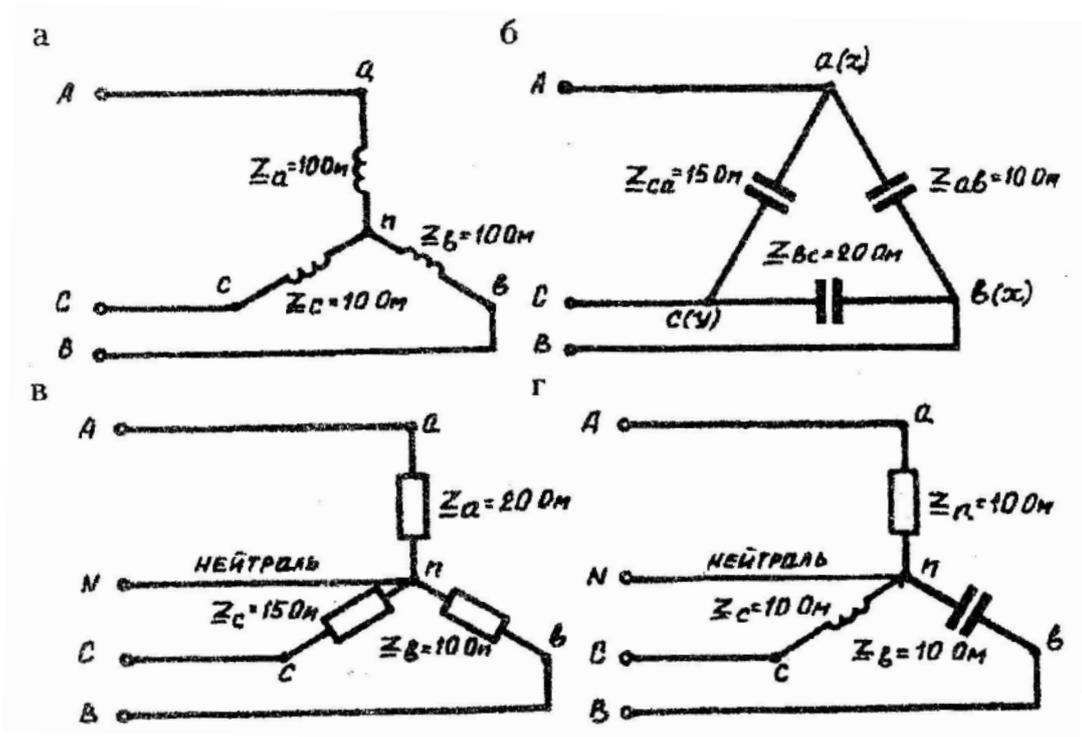


Рис.4.3. Схемы включения однофазных и трехфазных приемников:
а – трехфазный симметричный приемник (включение фаз звездой по трехпроводной схеме); б – трехфазный несимметричный однородный приемник (включение фаз треугольником); в – однофазный несимметричный однородный приемник (включение звездой по четырехпроводной схеме); г – однофазный несимметричный равномерный приемник (включение звездой по четырехпроводной схеме)

Рассмотрим схему четырехпроводной цепи, в которой фазы генератора и приемника соединены звездой (рис.4.4). Обычно сопротивления линейных проводов и нейтрального провода значительно меньше сопротивлений приемников, поэтому при расчете таких цепей сопротивление проводов можно не учитывать. Тогда фазные напряжения приемника U_A , U_B , U_C будут равны фазным напряжениям источника, т.е. $U_A=U_a$, $U_B=U_b$, $U_C=U_c$. Токи в каждой фазе приемника можно определить по формулам:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}, \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в нейтральном проводе $I_N=I_a+I_b+I_c=I_A+I_B+I_C$, т.к. в данной схеме соединения линейные токи I_A , I_B , I_C равны фазным I_a , I_b , I_c .

Векторная диаграмма напряжений и токов для несимметричного однородного приемника (см. рис. 4.3,в) представлена на рис. 4.5,а. При построении векторной диаграммы направления векторов U_A , U_B , U_C условно приняты от конца к началу фазы, а комплексная плоскость развернута на $\pi/2$ против часовой стрелки.

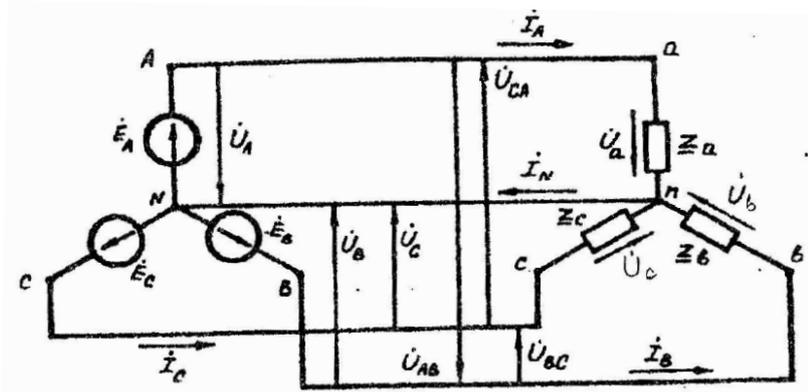


Рис.4.4. Схема четырехпроводной трехфазной цепи

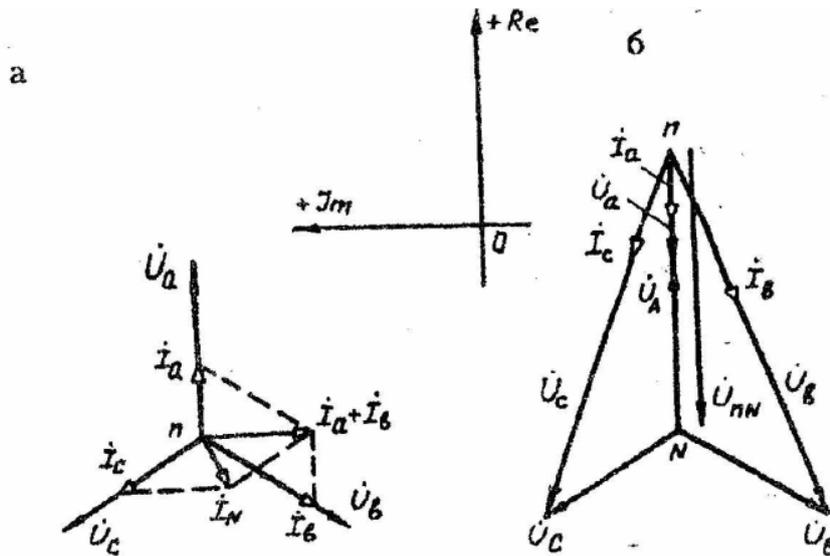


Рис.4.5. Векторные диаграммы напряжений и токов несимметричного однородного приемника, включенного звездой по четырехпроводной (а) и трехпроводной (б) цепи

Из рис. 4.5,а видно, что при равенстве токов в фазах приемника $\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c$, а это возможно лишь при симметричном приемнике $Z_a = Z_b = Z_c$, ток в нейтральном проводе I_N будет равен нулю. В этом случае необходимость в нейтральном проводе отпадает и схему трехфазной цепи можно сделать трехпроводной (рис.4.6).

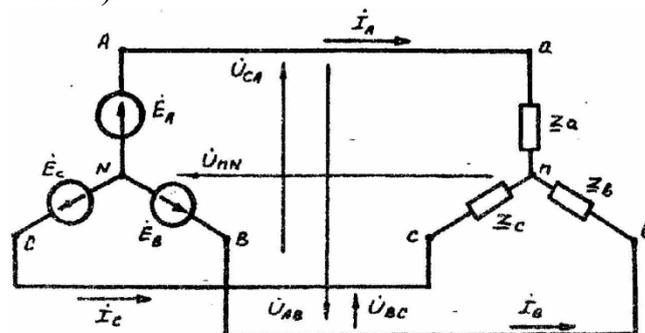


Рис.4.6. Схема трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой

Но для несимметричного приемника векторы токов $\dot{\mathbf{i}}_a = \dot{\mathbf{i}}_b = \dot{\mathbf{i}}_c$ уже не представляют собой симметричную систему (рис.4.5,а), и поэтому ток в нейтральном проводе не будет равен нулю. Значение и фаза тока I_N зависят не только от характера сопротивления фаз приемника, но и от схемы их включения. Например, если в схеме (рис.4.3,г) конденсатор C и катушку индуктивности L поменять местами, то ток в нейтральном проводе изменится в несколько раз.

Если по каким-либо причинам несимметричные приемники, соединенные звездой, окажутся включенными в трехпроводную сеть (рис.4.6), то между нейтральными точками приемника и источника возникнет напряжение U_{nN} , называемое **напряжением между нейтральными**:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – комплексные проводимости фаз приемника;

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазные напряжения источника.

В этом случае напряжения на фазах приемника будут отличаться друг от друга:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN},$$

а фазные токи будут соответственно равны:

$$\dot{\mathbf{i}}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \dot{U}_a \underline{Y}_a, \quad \dot{\mathbf{i}}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \dot{U}_b \underline{Y}_b, \quad \dot{\mathbf{i}}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \dot{U}_c \underline{Y}_c.$$

В четырехпроводной цепи напряжение между нейтральными может возникнуть в случае обрыва нейтрального провода, и тогда на некоторых фазах приемника напряжения и токи могут значительно превысить номинальные. На рис. 4.5,б представлена векторная диаграмма токов и напряжений для приемника (см. рис. 4.3,в) при обрыве нейтрального провода. Из сравнительного анализа векторных диаграмм (см. рис. 4.5) видно, что напряжения и токи в фазах b и c резко возросли, а в фазе a – уменьшились.

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает сохранение симметрии фазных напряжений несимметричного приемника, что является важнейшим преимуществом четырехпроводной цепи, так как при изменении режима работы одной из фаз режимы других фаз не изменяются.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде “Уралочка» схему четырехпроводной трехфазной цепи (рис. 4.7). Нагрузку в фазах подобрать на комплектующем

блоке при условии $R_a=R_b=R_c$, а сопротивление $R_n=100$ Ом – на магазине сопротивлений. Амперметры включить в фазу а и нейтральный провод. Подготовить один прибор ВР-11А в качестве вольтметра для измерения линейных и фазных напряжений в схеме.

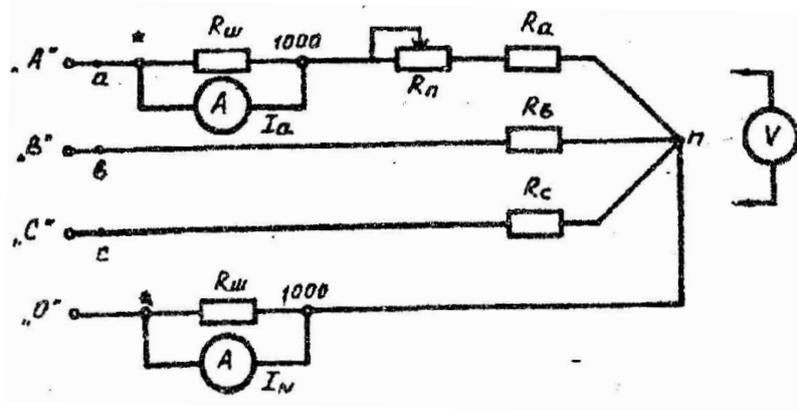


Рис. 4.7. Схема четырехпроводной трехфазной цепи при включении фаз однородного приемника звездой

2.2. Включить трехфазный источник и измерить токи в фазах и нейтральном проводе, фазные и линейные напряжения для следующих случаев:

- а) симметричный приемник ($R_n=0$);
- б) несимметричный приемник ($R_n=100$);
- в) обрыв фазы b .

Закончив измерения, выключить питание.

2.3. Собрать на стенде трехпроводную трехфазную цепь для симметричного приемника $R_a=R_b=R_c$ (рис. 4.8,а). Включить питание источника и измерить токи и напряжения при обрыве фазы b . Выключить питание.

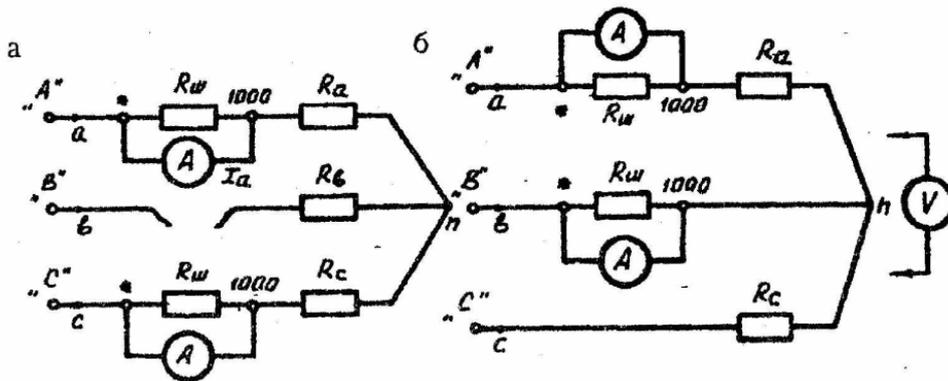


Рис.4.8. Схемы трехпроводной трехфазной цепи для исследования аварийных режимов: а – обрыв фазы b ; б – короткое замыкание в фазе b

2.4. Собрать на стенде трехпроводную трехфазную цепь для приемника, включенного звездой (рис. 4.8,б), и исследовать режим работы при коротком замыкании в фазе b . Выключить питание.

2.5. Результаты измерений по пп. 2.2-2.4 занести в табл.4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Результаты измерений параметров трехфазной цепи при включении приемника звездой

Режим	I_a	I_b	I_c	I_N	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
1. Симметричный с нейтралью										
2. Несимметричный с нейтралью										
3. Обрыв фазы b с нейтралью										
4. Обрыв фазы b без нейтрали										
5. КЗ в фазе b без нейтрали										

2.6. По данным табл.4.1 построить в масштабе векторные диаграммы для четырехпроводной (рис.4.9) и трехпроводной (рис.4.10) схем трехфазной цепи для исследуемых режимов работы.

2.7. Для каждого режима рассчитать активную мощность трехфазного приемника, используя следующие формулы:

$$P_a = I_a U_a, P_b = I_b U_b, P_c = I_c U_c, P = P_a + P_b + P_c.$$

2.8. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

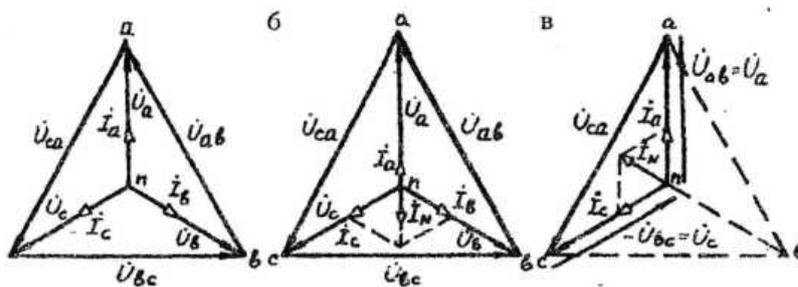


Рис.4.9. Векторные диаграммы токов и напряжений в четырехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой для симметричного (а), несимметричного (б) приемников и при обрыве фазы b (в)

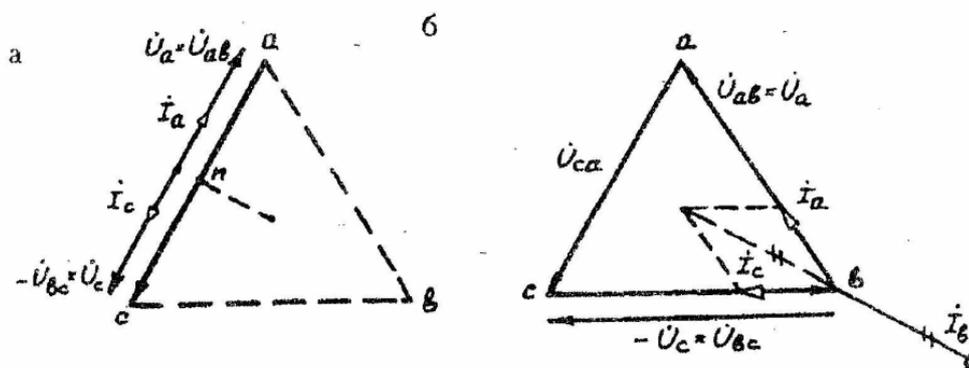


Рис.4.10. Векторные диаграммы токов и напряжений в трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой в аварийных случаях: а – обрыв фазы b ; б – короткое замыкание в фазе b

Контрольные вопросы

1. Характерная особенность четырехпроводной схемы трехфазной цепи переменного тока.
2. Раскрыть понятия «симметричный и несимметричный приемники трехфазной цепи».
3. Каково соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями в схеме соединения приемника звездой?
4. Какова роль нейтрального провода в трехфазной цепи?
5. Можно ли ставить плавкий предохранитель или выключатель на линию нейтрального провода?
6. Аварийные случаи в трехфазной цепи переменного тока и возможные последствия их возникновения.

Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: научиться исследовать основные и аварийные режимы работы трехфазной цепи переменного тока при соединении приемников треугольником; строить по опытным данным векторные диаграммы токов и напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках в фазах приемников.

1. Основные теоретические сведения

Приемники, включаемые в трехфазные цепи, в значительной части бывают несимметричными. Поэтому очень важно на практике обеспечить независимость режима работы отдельных фаз. Кроме четырехпроводной цепи подобными свойствами обладают и трехпроводные цепи при соединении фаз приемника треугольником (рис.5.1).

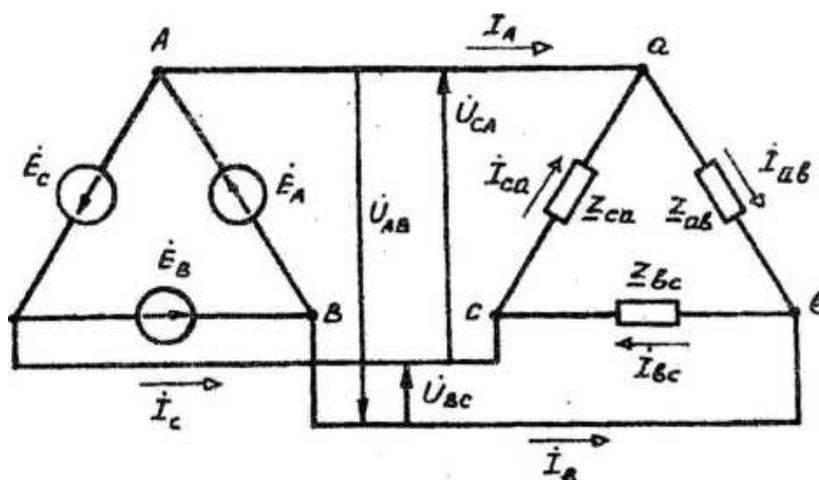


Рис.5.1. Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника треугольником

При этом фазные напряжения приемника равны соответствующим линейным напряжениям источника питания: $U_{ab}=U$, $U_{bc}=U_{BC}$, $U_{ca}=U_{CA}$. Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{\mathbf{i}}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}, \quad \dot{\mathbf{i}}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}, \quad \dot{\mathbf{i}}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}.$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнение по первому закону Кирхгофа для узлов a , b и c (см. рис.5.1):

$$\dot{\mathbf{I}}_A = \dot{\mathbf{i}}_{ab} - \dot{\mathbf{i}}_{ca}, \quad \dot{\mathbf{I}}_B = \dot{\mathbf{i}}_{bc} - \dot{\mathbf{i}}_{ab}, \quad \dot{\mathbf{I}}_C = \dot{\mathbf{i}}_{ca} - \dot{\mathbf{i}}_{bc}.$$

С помощью этих уравнений можно определить линейные токи графически, воспользовавшись векторной диаграммой фазных напряжений и токов (рис. 5.2,а или б). В данном случае приемник симметричный ($Z_{ab}=Z_{bc}=Z_{ca}$) и векторы фазных токов образуют симметричную систему. Кроме того, приемник резистивный, так как сдвиги фаз между токами и соответствующими фазными напряжениями равны нулю ($\varphi_{ab}=\varphi_{bc}=\varphi_{ca}=0$).

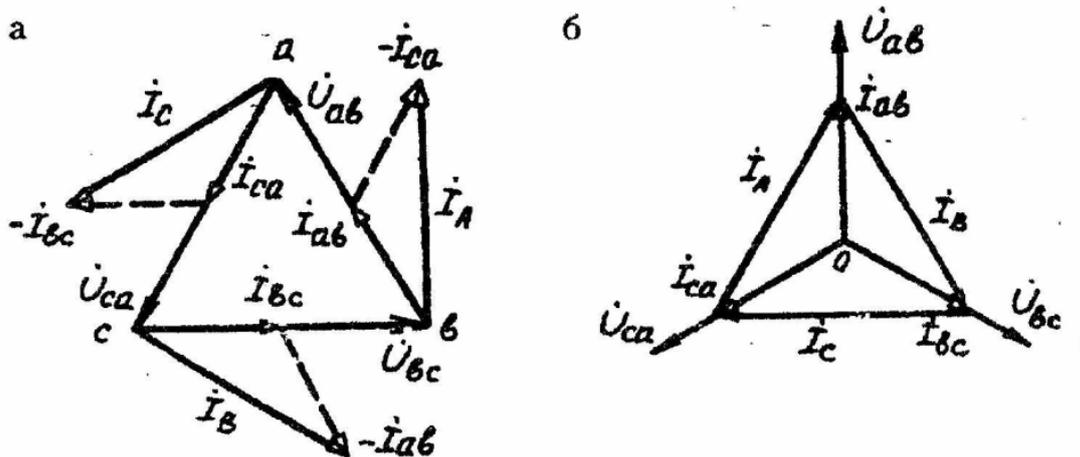


Рис. 5.2. Векторные диаграммы напряжений и токов симметричного приемника, соединенного треугольником

Из векторной диаграммы (см. рис.5.2,б) следует, что в случае симметричных приемников $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$. Сдвиг фаз между токами $I_{\text{л}}$ и $I_{\text{ф}}$ легко определить графически (см., например, рис.5.2,а). Следует обратить внимание на то, что в трехпроводной цепи, независимо от характера приемников, геометрическая сумма линейных токов равна нулю: $I_A + I_B + I_C = 0$.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему трехпроводной цепи согласно рис.5.3 с включением мультиметров ВР-11А в качестве амперметров по 1-й позиции. Их показания определяют фазные токи приемника I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} . Нагрузку в фазах следует брать:

$$R_{ab} = R_1 + R_2, R_{bc} = R_3 + R_4, R_{ca} = R_5 + R_6,$$

где R_1, \dots, R_6 – резисторы на комплектующем блоке.

В качестве потенциометра R_n использовать $R=200$ Ом из магазина сопротивлений.

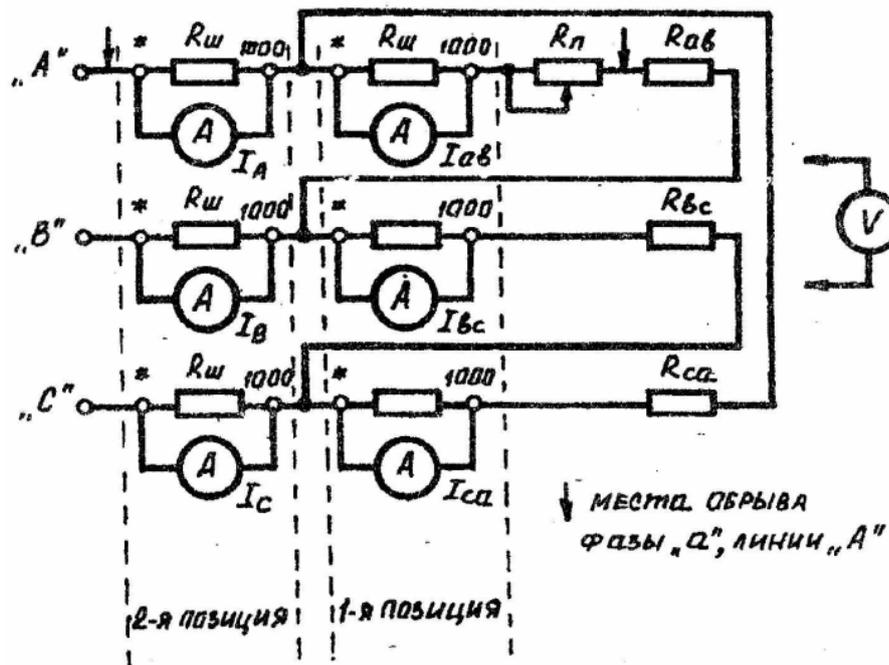


Рис.5.3. Схема сборки трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз резистивного приемника треугольком

2.2. Включить питание стенда и измерить фазные токи приемника для следующих режимов:

- несимметричный приемник ($R_n = 200 \text{ Ом}$);
- симметричный приемник ($R_n = 0$);
- обрыв фазы a ;
- обрыв линейного провода A .

Выключить питание.

2.3. Собрать схему трехпроводной цепи с включением амперметров по 2-й позиции (см. рис.5.3). Их показания определяют линейные токи I_A, I_B, I_C .

Включить питание стенда и измерить линейные токи для тех же режимов (см. пп. 2.2). Выключить питание.

2.4. Результаты измерений по пп. 2.2 и 2.3 занести в табл.5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Результаты исследования режимов работы трехпроводной трехфазной цепи при соединении приемников треугольником

Режимы	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
	А	А	А	А	А	А	В	В	В
1. Несимметричный приемник									
2. Симметричный приемник									
3. Обрыв фазы a									
4. Обрыв линии A									

Так как фазные напряжения приемника U_{ϕ} равны линейным напряжениям источника, а они нам известны из результатов выполнения предыдущих лабораторных работ, то измерение U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} следует провести только для режима «обрыв линейного провода».

2.5. По данным табл. 5.1 в выбранном масштабе построить векторные диаграммы для всех исследуемых режимов (см. рис. 5.2 и 5.4).

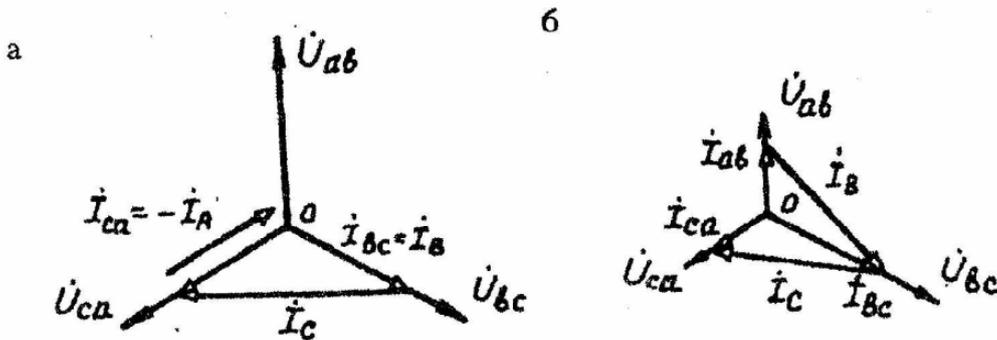


Рис. 5.4. Векторные диаграммы напряжений и токов симметричного приемника при аварийных режимах:
а – обрыв фазы a ; б – обрыв линии A

2.6. Рассчитать активную мощность приемника для каждого режима, используя формулы:

$$P_a = U_{ab} I_{ab}, P_b = U_{bc} I_{bc}, P_c = U_{ca} I_{ca}, P = P_a + P_b + P_c.$$

Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяют трехпроводные трехфазные цепи при соединении фаз приемника треугольником?
2. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями в трехпроводной цепи при соединении приемники треугольником?
3. Построить векторную диаграмму для симметричного активно-индуктивного приемника, соединенного треугольником.
4. Как изменяются фазные напряжения приемника, соединенного треугольником, при обрыве линейного провода?
5. Чему равны активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи симметричного приемника?

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: познакомиться с устройством и принципом действия трансформатора; исследовать основные режимы работы трансформатора, экспериментально определить его основные параметры.

1. Основные теоретические сведения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Конструктивно трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, выполненный из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, на котором расположены в общем случае две обмотки (рис.6.1). К одной обмотке с числом витков w_1 , которая называется первичной, подводится электрическая энергия от источника питания; от другой (вторичной обмотки с числом витков w_2) энергия отводится к приемнику (Z_H). Все электрические параметры, относящиеся к этим обмоткам (I , E , P и др.), называются первичными или вторичными и имеют соответствующие индексы 1 и 2.

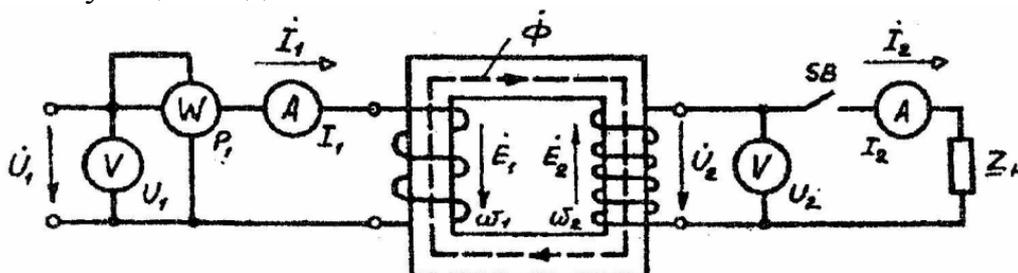


Рис. 6.1. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Под действием подведенного переменного напряжения U_1 в первичной обмотке возникает ток I_1 и возбуждается изменяющийся магнитный поток Φ . Этот поток индуцирует ЭДС E_1 и E_2 в обмотках трансформатора. ЭДС E_1 уравнивает основную часть напряжения источника U_1 ЭДС, E_2 создает напряжение U_2 на выходных зажимах трансформатора.

При замыкании ключа SB во вторичной цепи возникает ток I_2 , который образует в магнитопроводе собственный магнитный поток Φ' , накладывающийся на поток первичной обмотки Φ . В результате создается общий поток Φ , сцепленный с витками обеих обмоток трансформатора и определяющий в них результирующие ЭДС E_1 и E_2 .

На рис. 6.1 показаны условно-положительные направления всех физических величин, характеризующих электромагнитный процесс в трансформаторе. Так, положительное направление потока Φ связано с током I_1 правилом правоходового винта. То же правило определяет положительное направление потока Φ , ЭДС E_1 и E_2 ; тока и напряжения во вторичной цепи. Это позволяет правильно записать уравнения электрического состояния трансформатора.

Рассматривая принцип действия трансформатора, обычно пренебрегают магнитным полем рассеяния и активным сопротивлением обмоток. Такой трансформатор называют идеализированным.

Уравнения электрического состояния обмоток идеализированного трансформатора для мгновенных значений параметров имеют вид:

$$u_1 = -e_1, u_2 = +e_2,$$

где $e_1 = +w_1 \frac{d\Phi}{dt}$, $e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$.

Отношения напряжений и ЭДС

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{w_1}{w_2} = K.$$

называют коэффициентом **трансформации**. Из последнего следует, что форма кривых напряжений $u_2(t)$ и $u_1(t)$ одинакова. В трансформаторе происходит «масштабное» преобразование переменного напряжения в K раз. При синусоидальном первичном напряжении вторичное напряжение также синусоидально. Отношение комплексных напряжений:

$$\frac{\dot{U}_{1m}}{\dot{U}_{2m}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = K.$$

Действующие значения напряжений связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = K.$$

Поток в магнитопроводе определяется напряжением u_1 :

$$\Phi(t) = \frac{1}{W_1} \int u_1(t) dt.$$

При $u_1(t) = U_{1m} \sin \omega t$ $\Phi_m = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega}$

В трансформаторе происходит преобразование не только переменных напряжений, но и токов. Уравнение магнитного состояния идеализированного трансформатора имеет вид: $w_1 i_1 + w_2 i_2 \approx 0$.

$$\text{Отсюда } -\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{K}.$$

Следовательно, кривые изменения токов $i_2(t)$ и $i_1(t)$ подобны. Действительное направление тока $i_2(t)$ противоположно направлению тока $i_1(t)$ относительно одноименных выводов обмоток w_1 и w_2 . Поэтому магнитодвижущие силы (МДС) первичной $w_1 i_1$ и вторичной $w_2 i_2$ обмоток действуют встречно и уравниваются друг друга.

При синусоидальных токах:

$$-\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{1}{K}, \quad \frac{I_2}{I_1} = K.$$

Возьмем отношения

$$\frac{u_1 i_1}{u_2 i_2} = \frac{p_1}{p_2} = 1 \text{ или } p_1 = p_2.$$

В идеализированном трансформаторе электрическая энергия передается полностью из первичной обмотки во вторичную и далее в приемник, хотя обмотки имеют только магнитную связь и электрически изолированы друг от друга.

Кроме того, трансформатор обладает свойством саморегулирования тока i_1 .

При изменении нагрузки (тока i_2) выполняется закон сохранения энергии и обеспечивается баланс мгновенных мощностей $p_1 = p_2$ или $u_1 i_1 = u_2 i_2$.

Трансформатор характеризуется следующими основными параметрами:

- номинальной мощностью S_H , В·А;
- номинальными значениями напряжения и тока в первичной U_{1H} , I_{1H} и вторичной U_{2H} , I_{2H} цепях;
- количеством обмоток и схемой их соединения;
- относительным значением напряжения короткого замыкания (КЗ) U_{K3} %.

Различают следующие режимы работы трансформатора:

1. Режим холостого хода (XX) – исследовательский режим. При этом $I_2 = 0$, $Z_H = \infty$ (см. рис.6.1 – переключатель SB разомкнут). В режиме XX можно определить:

- коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (U_{1x} \leq 1,1 U_{1H});$$

- потери мощности в магнитопроводе на нагрев трансформатора

$$P_{\text{н.наг}} = P_{1x} - I_{1x}^2 R_1;$$

- коэффициент мощности XX $\cos \varphi_x = \frac{P_{1x}}{U_{1x} I_{1x}};$

– активную $I_{\text{та.х}} = I_{\text{тх}} \cos \varphi_x$ и реактивную $I_{\text{р.х}} = I_{1x} \sin \varphi_x$ составляющие тока XX.

2. Опыт КЗ – исследовательский режим. При этом $Z_{\text{н}}=0$

$$U_{1к} \approx (5...10)\%U_{1н}, \quad I_{1к} = I_{1н}. \quad \text{Тогда } E_2 = (2...5)\%E_{2н}.$$

При опыте КЗ можно определить:

- мощность потерь в обмотке трансформатора

$$P_{\text{н.обм}} = P_{1к} \quad \text{или} \quad P_{\text{н.обм}} = I_{1н}^2 R_1 + I_{2н}^2 R_2;$$

- коэффициент мощности при КЗ $\cos \varphi_k = \frac{P_{1к}}{U_{1к} I_{1к}};$

- активное, полное и реактивное сопротивления КЗ:

$$U_{\text{а.к}} = \frac{R_k I_{1к}}{U_{1н}} 100\%, \quad U_{\text{р.к}} = \frac{X_k I_{1н}}{U_{1н}} 100\%, \quad U_k = \frac{Z_k I_{1н}}{U_{1н}} 100\%;$$

- коэффициент трансформации $K = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} 100\%.$

Следует заметить, что опыты XX и КЗ проводят на заводе-изготовителе при испытаниях трансформатора. Результаты испытаний вносят в паспорт трансформатора.

3. Рабочий режим – основной режим работы трансформатора под нагрузкой. Важнейшим показателем трансформатора в рабочем режиме является его внешняя вольт-амперная характеристика:

$$U_2 = f(I_2) \quad \text{при} \quad U_1 = U_{1н} \quad \text{и} \quad \cos \varphi_2 = \text{const} \quad (\text{рис. 6.2}).$$

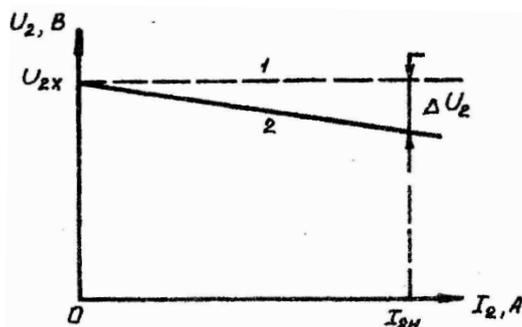


Рис. 6.2. Внешняя характеристика идеального (1) и реального (2) трансформаторов

У идеализированного трансформатора $U_2 = \frac{U_1}{K} = U_{2к} = \text{const}$, т.е. напряжение U_2 не зависит от нагрузки. У реального трансформатора существуют ЭДС от полей рассеяния и падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток. При обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается с ростом тока I_2 . Изменение вторичного напряжения $\Delta U_2 = U_{2х} - U_2$ характеризует устойчивость работы трансформатора. У силовых трансформаторов при $I_2 = I_{2н}$ отношение $\Delta U_2 / U_{2х}$ имеет порядок 5-10 %. Трансформаторы проектируются так, чтобы напряжение ХХ $U_{2х}$ было на 5 % больше номинального напряжения приемников электрической энергии.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Электрические машины» схему согласно рис.6.3. Выписать данные трансформатора и электроизмерительных приборов.

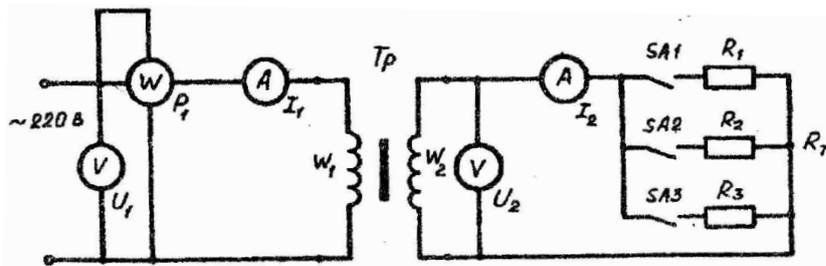


Рис. 6.3. Схема исследования однофазного трансформатора на лабораторном стенде

2.2. Исследовать режимы ХХ и рабочий при изменении нагрузки R_T . Данные занести в табл.6.1.

Т а б л и ц а 6.1

Результаты исследования однофазного трансформатора

Режим работы	Измерено						Вычислено			
	R_T	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	K	$\cos \varphi$	P_2	η
		В	В	Вт	В	А			Вт	%
ХХ	∞									
Рабочий	$R_T = R_1$									
	$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$									
	$R_T = R_T$									

Расчетные формулы для ХХ:

$$K = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}, \cos \varphi_x = \frac{P_{1x}}{U_{1x} I_{1x}}.$$

Для рабочего режима: $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ при $\cos \varphi_2 = 0,85$, $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$.

2.3. Для рабочего режима построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$ и оценить величину ΔU_2 .

2.4. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Что называется трансформатором и каковы основные режимы его работы?
2. В чем заключается принцип трансформации напряжения и тока?
3. Что называется коэффициентом трансформации? Способы его определения.
4. Паспортные данные трансформатора. Что они определяют?
5. Показать графически внешнюю характеристику трансформатора. Что она определяет?
6. Применение трансформаторов на объектах строительства.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучение особенностей конструкции трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, приобретение навыков построения его механической характеристики, исследование режимов работы асинхронного двигателя при изменении нагрузки на валу.

1. Основные теоретические сведения

Электроприводы большинства машин и механизмов, используемых в строительном производстве, в своей структуре в качестве исполнительных устройств содержат трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Они отличаются простотой конструкции и обслуживания, имеют меньшую стоимость по сравнению с другими двигателями постоянного и переменного тока.

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижной части – статора и подвижной вращающейся части – ротора. Статор представляет собой литой корпус, в который запрессован пакет штампованных листов электротехнической стали. В пазах пакета размещена трехфазная обмотка в виде трех отдельных катушек (или групп катушек), сдвинутых по окружности статора относительно друг друга на $2/3\tau$, где $\tau = \pi D_{ст}/2$ – ширина полюса, а $D_{ст}$ – диаметр статора.

Ротор представляет собой цилиндр, также набранный из штампованных листов электротехнической стали, насаженных в виде пакета на вал ротора. На наружной части пакета ротора имеются пазы, в которых укладывается обмотка ротора. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется из медных или алюминиевых стержней способом заливки пазов пакета расплавленным металлом, при этом на торцевых частях ротора одновременно отливаются замыкающие кольца и лопасти вентилятора. Такая обмотка получила название «беличье колесо», т.к. проводники образуют фигуру, похожую на колесо для белки.

Вал ротора установлен на подшипниках в подшипниковых щитах, укрепляемых по торцам статора. На корпусе имеется коробка выводов, в которой размещены начала (C_1, C_2, C_3) и концы (C_4, C_5, C_6) катушек каждой фазы обмотки статора (рис.7.1). Фазы обмотки статора могут быть соединены звездой или треугольником.

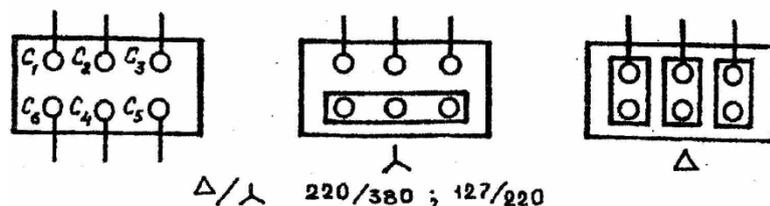


Рис. 7.1. Щиток с выводами фаз обмотки статора и способы их включения

Принцип действия асинхронного двигателя основан на двух явлениях: образовании рабочего вращающегося магнитного поля тока в обмотке статора и воздействии этого поля на токи, индуцированные в короткозамкнутых витках ротора.

Условия образования вращающегося магнитного поля трехфазной обмотки статора:

- смещение катушек разных фаз на $2/3\tau$;
- сдвиг токов в катушках по фазе на $2/3\pi$;
- равенство действующих фазных МДС ($W_A I_A = W_B I_B = W_C I_C$).

За один период T магнитное поле делает полный оборот. Угловая скорость этого поля зависит от частоты токов статорной обмотки ω и числа пар полюсов p : $\Omega = \omega/p$.

Обычно скорость вращения характеризуется частотой вращения:

$$\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}; \quad \omega = 2\pi f; \quad \frac{\pi n_1}{30} = \frac{2\pi f}{p}.$$

Откуда $n_1 = \frac{60f}{p}$ об/мин.

При промышленной частоте $f=50$ Гц частота вращения магнитного поля статора n_1 получает фиксированные значения в зависимости от числа пар полюсов $p=1,2,3,\dots$, т.е. от конструкции машины:

$$n_1=3000; 1500; 1000,\dots \text{ об/мин.}$$

В проводниках обмотки ротора вращающееся магнитное поле индуцирует ЭДС E_2 , которая создает в короткозамкнутой обмотке ротора ток I_2 . На проводники ротора с током I_2 во вращающемся магнитном поле статора действует электромагнитная сила F , возникает электромагнитный момент $M = FD/2$, где D – диаметр ротора. Этот момент M заставляет ротор вращаться вслед за полем статора. Однако ротор никогда не сможет вращаться с той же скоростью, что и поле статора, так как при равенстве их скоростей будет индуцироваться ЭДС E_2 в обмотке ротора и, следовательно, не будет создаваться ток ротора I_2 . Обозначив частоту вращения ротора n_2 , условие образования вращающегося электромагнитного момента можно выразить следующим образом:

$$M > 0, \text{ если } n_2 < n_1.$$

Таким образом, ротор асинхронного двигателя вращается несинхронно-асинхронно по отношению к полю статора. Относительную частоту $n_s = n_1 - n_2$ называют **частотой скольжения**, а отношение $\frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ — **скольжением**. Скольжение играет фундаментальную роль в теории асинхронных машин и определяет режимы работы асинхронной машины (рис.7.2).

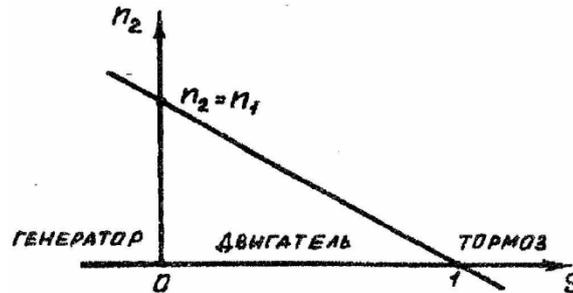


Рис.7.2. Режимы работы асинхронной машины

Асинхронные двигатели проектируют так, что при работе на холостом ходу $n_{2x} \approx n_1$ и $S_x = 0,001 - 0,05$, при номинальной нагрузке $n_{2н} \approx 0,95n_1$ и $S_n = 0,05$.

Зависимость электромагнитного момента M от величины скольжения S определяется выражением

$$M = \frac{2M_{кр}}{S / S_{кр} + S_{кр} / S},$$

где $M_{кр}$ — критический (максимальный) момент, величина которого пропорциональна квадрату напряжения питания статора U_1^2 и может быть определена через перегрузочную способность двигателя $\lambda = 1,7 \dots 2,5$,

$$M_{кр} = \lambda M_n;$$

здесь M_n — номинальный момент двигателя, определяемый по паспортным данным;

$S_{кр}$ — критическое скольжение, которому соответствует $M = M_{кр}$,

$$S_{кр} = S_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right).$$

От зависимости $M=f(S)$ можно перейти к механической характеристике двигателя $n_2=f(M)$, учитывая, что $n_2 = n_1(1-S)$ (рис.7.3).

В установившемся режиме при номинальной нагрузке $M = M_n - M_{пр1}$. При этом $dn_2/dt=0$ и частота вращения двигателя $n_2=n_{2н}=const$. С увеличением противодействующего момента $M_{пр2}>M_{пр1}$ равновесие моментов в правой части уравнения нарушается. Это приводит к тому, что $dn_2/dt<0$ и двигатель уменьшает обороты на величину Δn_2 . В связи с этим частота скольжения n_s увеличивается, повышается скорость вращения магнитного поля статора машины, а значит, увеличивается индуцированная в проводниках ротора ЭДС E_2 . Следовательно, возрастают токи ротора I_2 , электромагнитная сила F и электромагнитный момент $M=M_n+\Delta M$. Таким образом, автоматически восстанавливается равновесие моментов на валу. При этом вал двигателя вращается с меньшей частотой $n_2 = n_{2н} - \Delta n_2$. И наоборот, при уменьшении $M_{пр}$ уменьшается момент двигателя M , но возрастает частота вращения вала двигателя n_2 .

Из рис.7.3 видно, что свойство саморегулирования на участке неустойчивой работы не выполняется. При любом изменении момента сопротивления M_c падает частота вращения n_2 и уменьшается момент двигателя M , а это приводит к его остановке.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя показывают зависимость эксплуатационных параметров машины от мощности на валу двигателя P_2 . К этим параметрам относятся: ток в обмотке статора I_2 , частота вращения вала двигателя n_2 , электромагнитный момент M , коэффициент мощности $\cos\varphi$ и КПД η . Выражая параметры в относительных единицах по отношению к номинальным значениям, можно получить типовые рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис.7.4).

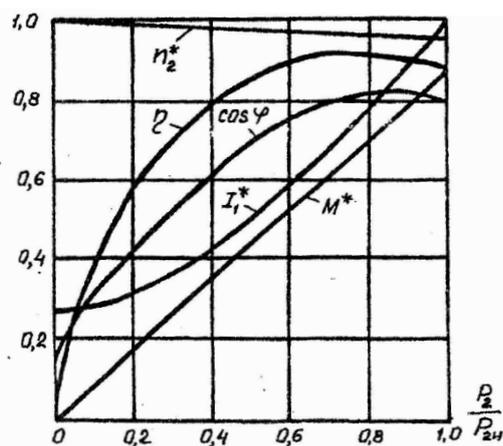


Рис.7.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Анализ рабочих характеристик позволяет сделать следующие обобщенные выводы:

1) частота вращения вала двигателя n_2 мало зависит от изменения мощности: $n_2 - (0,995...0,998)n_1$, $n_{2к} = 0,95n_1$;

2) КПД при отсутствии нагрузки равен нулю; по мере увеличения мощности P_2 КПД (η) повышается; максимум η находится в пределах $(0,7...0,8)P_{2н}$, затем уменьшается из-за увеличения потерь в обмотках двигателя;

3) коэффициент мощности $\cos\varphi$ при холостом ходе $P_2=0$ имеет значение примерно 0,2, что указывает на недопустимость длительной работы двигателя без нагрузки. При номинальной нагрузке $\cos\varphi = 0,7...0,8$;

4) момент на валу M пропорционален мощности P_2 во всем диапазоне изменения нагрузки;

5) ток статора I_1 в режиме холостого хода существенно зависит от величины воздушного зазора δ и в зависимости от мощности двигателя P_2 находится в пределах $(0,2...0,5)i_{1н}$, но по мере увеличения нагрузки ток статора возрастает.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Для асинхронного двигателя на лабораторном стенде типа А02 32-6У-3 выписать паспортные данные $P_{2н}$, U_1 , $I_{1п} / I_{1н}$, $\cos\varphi_n$, η_n .

2.2. По паспортным данным двигателя построить его механическую характеристику $n_2=f(M)$.

Пример. Для асинхронного двигателя с КЗ ротором типа ЧА906У3 требуется построить механическую характеристику по следующим паспортным данным: $P_{2н}=2,2$ кВт, $n_{2н}=950$ об/мин, $\lambda=2,1$.

Для этого:

1) определяем номинальный момент

$$M_n = 9,55 \frac{P_{2н}}{n_{2н}} = 9,55 \frac{2200}{950} \approx 22 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

2) находим критическое (максимальное) значение моменты

$$M_{кр} = \lambda M_n = 2,1 \cdot 22 \approx 46 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

3) определяем частоту вращения магнитного поля статора n_1 , исходя из следующих соображений: n_1 чуть больше $n_{2н}$ (см. рис. 7.3), имеет фиксированные значения в зависимости от числа пар полюсов $p=1, 2, 3...$

Так как $n_{2н}=950$ об/мин, то $n_1 = \frac{n_{2н}}{0,95} = 1000$ об/мин;

4) находим номинальное S_n и критическое $S_{кр}$ скольжение:

$$S_n = \frac{n_1 - n_{2н}}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05;$$

$$S_{кр} = S_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,05 \left(2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1} \right) = 0,2;$$

5) определяем координаты основных режимов работы двигателя на механической характеристике, используя следующие уравнения:

$$M = \frac{2M_{кр}}{S/S_{кр} + S_{кр}/S}, \quad n_2 = n_1(1 - S).$$

Результаты вычислений удобно свести в таблицу.

Режимы работы	Скольжение	$M = \frac{2 \cdot 46}{0,2/S + S/0,2}$, Н·м	$n_2 = 1000(1 - S)$. об/мин
Холостой ход	0	0	1000
Номинальный	0,05	22	950
Критический	0,2	46	800
Пусковой	1	18	0

Полученные результаты позволяют построить механическую характеристику двигателя $n_2=f(M)$. Для повышения точности построения участка устойчивой работы можно получить дополнительные данные для M и n_2 , задаваясь значениями скольжения S в интервале 0-0,2.

2.3. Собрать на стенде схему, представленную на рис.7.5.

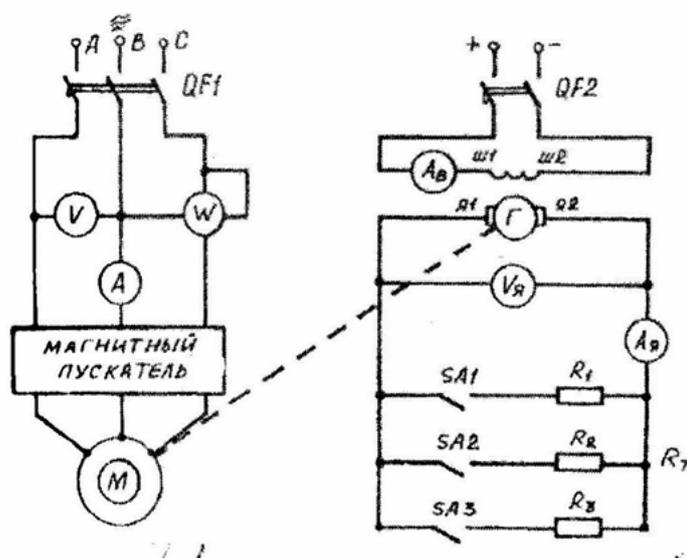


Рис.7.5. Схема испытаний асинхронного двигателя

2.4. Подготовить стробоскопический тахометр для измерения частоты вращения вала двигателя. Тахометр состоит из измерительного блока и импульсной газоразрядной лампы B измерительном блоке находится генератор импульсов регулируемой частоты, выполняющей роль регулятора вспышек лампы. На лицевой панели блока размещены:

- тумблеры включения сети, синхронизации и лампы;

- ручка переключателя диапазонов частоты;
- ручки для грубого и точного регулирования частоты вспышек газоразрядной лампы, связанные со стрелкой отчета.

Включить тахометр в сеть 220 В. После прогрева блока (5...10 мин) включить тумблер лампы. Выбор диапазона частот должен соответствовать паспортным данным исследуемого двигателя.

Работа с тахометром заключается в том, чтобы для вращающегося с неизвестной частотой вала, на котором закреплен диск с закрасенным сектором, подобрать такую частоту вспышек лампы, при которой интервал между вспышками будет равен времени одного оборота вала двигателя. Тогда для наблюдателя вращающийся вал с сектором будет казаться неподвижным. Показания на шкале блока в этот момент будут соответствовать частоте вращения вала n_2 .

2.5. После проверки правильности сборки схемы и подготовки стробоскопического тахометра запустить асинхронный двигатель, записать в табл.7.1 показания электроизмерительных приборов в цепях питания двигателя, генератора постоянного тока и тахометра, а также следующих значениях сопротивления R_T :

$$R_T = 0 \text{ (} SA1, SA2, SA3 \text{ разомкнуты);}$$

$$R_T = R_1 \text{ (замкнут } SA1);$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \text{ (замкнуты } SA1 \text{ и } SA2);$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \text{ (замкнуты все выключатели } SA1, SA2, SA3).$$

Т а б л и ц а 7.1

Режимы работы	Измерено						Вычислено						
	U	I	P	n_2	$U_{и}$	$I_{и}$	S	$\cos \varphi$	M	P_2	P_{2*}	η	η^*
	В	А	Вт	об/мин	В	А	ВА		Н·м	Вт	Вт		
$R_T = 0$													
$R_T = R_1$													
$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$													
$R_T = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$													

Расчетные формулы:

– полной мощности, потребляемой двигателем, $S = \sqrt{3}UI$;

- коэффициента мощности $\cos \varphi = \frac{P}{S}$;
- момента двигателя $M = \frac{2M_{кр}}{S / S_{кр} + S_{кр} / S}$, где $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ – скольжение;
- механической мощности на валу двигателя $P_2 = M \frac{n_2}{9,55}$;
- мощности, преобразуемой генератором постоянного тока в электрическую $P_2 = \frac{U_a I_a}{\eta_r}$, где η_r – КПД генератора (0,85);
- КПД двигателя $\eta = \frac{P_2}{3P}$;
- КПД системы «двигатель – генератор» $\eta^* = \frac{P_{2*}}{3P}$;

2.6. Результаты измерений и вычислений точек с координатами n_2 , M нанести на механическую характеристику двигателя, построенную по паспортным данным. Сделать выводы по режиму работы двигателя при изменении нагрузки.

2.7. Определить значения $n_{2*} = \frac{n_2}{n_{2н}}$, η , $\cos \varphi$, $I^* = \frac{I_1}{I_{1н}}$, $M^* = \frac{M_1}{M_{н}}$ как функции аргумента $\frac{P_2}{P_{2н}}$ для всех режимов работы двигателя.

Результаты нанести на типовые рабочие характеристики (см. рис. 7.4) и сделать выводы о соответствии экспериментальных данных теоретическим положением.

Контрольные вопросы

1. Общее устройство и принцип работы асинхронного двигателя.
2. Почему двигатель называется асинхронным?
3. Какова роль скольжения в определении режима работы асинхронной машины?
4. Как определить частоту вращения магнитного поля статора по паспортным данным асинхронной машины?
5. Вычертить механическую характеристику асинхронного двигателя и указать на ней характерные точки, определяющие режимы работы двигателя.
6. В чем состоит свойство саморегулирования асинхронного двигателя?
7. Определить число пар полюсов магнитного поля статора, если известно, что номинальная частота вращения двигателя по паспортным данным равна 540 об/мин, 970 об/мин.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: изучение особенностей конструкции электрической машины постоянного тока, исследование режимов работы двигателя постоянного тока при изменении нагрузки, построение механической и рабочих характеристик двигателя по опытным данным.

1. Основные теоретические сведения

Электрические машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей и несколько меньше – в качестве генераторов электрической энергии. Это объясняется важными преимуществами двигателей постоянного тока перед другими двигателями: они допускают плавное регулирование частоты вращения простыми способами и обладают лучшими пусковыми качествами – развивают большой пусковой момент при относительно небольшом токе. Поэтому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте.

Электрическая машина постоянного тока состоит из двух частей: неподвижной части – статора и подвижной (вращающейся) части – якоря.

Статор включает в себя станину, основные и дополнительные полюсы, обмотку возбуждения, щеткодержатели с электрографитовыми щетками, подшипниковые щиты с подшипниками, коробку с выводными зажимами. При подаче питания на обмотку возбуждения в статоре образуется магнитное поле машины Φ .

Якорь состоит из барабана, набранного из листов электротехнической стали и закрепленного на валу. В пазах барабана уложена якорная обмотка, выводы отдельных секций которой припаиваются к изолированным друг от друга пластинам коллектора. Пластины коллектора при вращении якоря контактируют со щетками статора.

Электрические машины обладают свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому, если якорную обмотку машины постоянного тока подключить к источнику постоянного тока, это вызовет ток в цепи якоря $I_{\text{я}}$. Взаимодействие тока якоря $I_{\text{я}}$ с магнитным полем обмоток возбуждения создает на валу якоря электромагнитный момент

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}},$$

где C_M – конструктивная постоянная машины.

Этот момент M является вращающим моментом, под действием которого якорь машины начнет вращаться, т.е. машина будет работать в режиме электродвигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую.

При вращении якоря в магнитном поле в его обмотке индуцируется ЭДС $E=C_e n \Phi$, направление которой противоположно направлению тока $I_{я}$. Ток направлен против ЭДС. Поэтому ЭДС якоря двигателя называют противоЭДС E .

Уравнение электрического состояния машины имеет вид

$$U = E + I_{я} R_{я}. \quad (8.1)$$

Отсюда ток якоря двигателя определится как

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}.$$

Умножив в выражении (8.1) левую и правую части на $I_{я}$, получим уравнение баланса мощностей:

$$UI_{я} = EI_{я} + I_{я}^2 R_{я}.$$

где $UI_{я}$ – электрическая мощность, подводимая к двигателю,

$$UI_{я} = P_{э} = P_1;$$

$EI_{я}$ – электромагнитная мощность двигателя,

$$EI_{я} = P_{эм} = P_{мех} = \Omega M = \frac{\pi n}{30} M,$$

т.е. равна механической мощности, развиваемой двигателем;

$I_{я}^2 R_{я}$ – мощность потерь в цепи якоря.

Электромагнитный момент M приводит якорь двигателя во вращение, которое через вал передается исполнительному механизму. При этом на вал двигателя действуют следующие моменты:

1) вращающий (электромагнитный) момент $M = 9,55 \frac{P_{эм}}{n}$;

2) момент холостого хода M_0 , обусловленный механическими и магнитными потерями в двигателе. Величина момента M_0 не зависит от нагрузки и составляет 2-6 % от номинального значения вращающего момента M_n ;

3) полезный момент M_2 , т.е. противодействующий момент механизма ($M_{пр}$), приводимого в действие данным двигателем;

4) динамический момент M_d , возникающий при всяком изменении угловой скорости Ω (частоты вращения n) двигателя в связи с инерцией вращающихся частей двигателя и механизма при изменении нагрузки:

$$M_d = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{или} \quad M_d = kJ \frac{dn}{dt}, \quad k = \frac{\pi}{30}.$$

Уравнение движения двигателя имеет вид

$$kJ \frac{dn}{dt} = M - (M_2 + M_0) = M - M_{ст}, \quad (8.2)$$

где $M_{ст}$ – статический момент сопротивления на валу двигателя.

В установившемся режиме работы $\frac{dn}{dt} = 0$ и $M = M_2 + M_0 = M_{ст}$.

Частота вращения двигателя определяется из формулы противоЭДС $E = C_E n \Phi$:

$$n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U - I_{я} R_{я}}{C_E \Phi}.$$

Электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую энергию вращения. Механическая мощность $P_{мех} = \frac{\pi n}{30} M$, Вт, определяется развиваемым двигателем моментом M и частотой вращения n , об/мин. Поэтому основной характеристикой двигателя является его механическая характеристика $n=f(M)$.

Вращающий момент $M=C_M \Phi I_{я}$ определяется током якоря $I_{я}$ и магнитным потоком полюсов возбуждения и, следовательно, зависит от способа возбуждения. Различают (рис.8.1) двигатели независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения.

Независимо от способа возбуждения всем электродвигателям постоянного тока присущи общие свойства и процессы: свойство саморегулирования, процессы пуска и реверса, регулирование частоты вращения.

Пуском называют процесс разгона якоря от неподвижного состояния до установившегося значения скорости. Пусковые качества двигателя характеризуются кратностью (к номинальному) пускового тока и момента. Если не принять специальных мер, то пуск двигателя постоянного тока может сопровождаться недопустимо большим броском тока якоря и резким толчком момента на валу (рис.8.2).

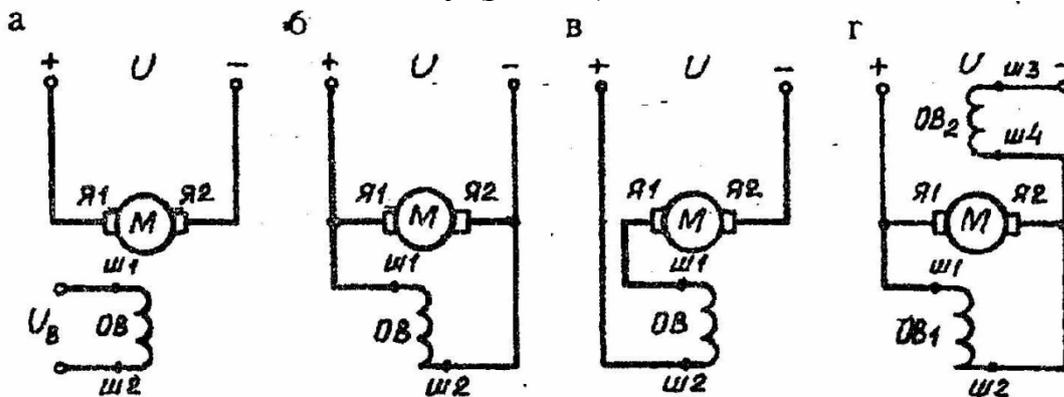


Рис.8.1. Способы возбуждения двигателей постоянного тока

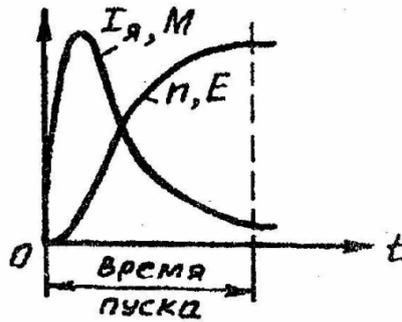


Рис.8.2. Изменение параметров двигателя при пуске

Это объясняется тем, что если во вращающемся якоре ток $I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}$,

то в момент включения номинального напряжения сети на обмотку неподвижного якоря в нем не наводится противоЭДС ($E=0$ при $n=0$). Ток включения (пусковой ток) ограничивается только малым сопротивлением $R_{я}$:

$$I_{п} = \frac{U_{н}}{R_{я}} \approx (10 - 30) I_{я}.$$

Такой большой ток вызывает опасное искрение на коллекторе и чрезмерно большой пусковой момент $M_{п} = C_M \Phi I_{я}$, создающий рывок и удар на валу. Для предотвращения этого пуск электродвигателей производят пусковым реостатом с сопротивлением $R_{п}$, ограничивающим бросок тока до кратковременного допустимого значения:

$$I_{п.доп} = \frac{U_{н}}{R_{я} + R_{п}} \leq (2 - 2,5) I_{я}.$$

С разгоном якоря возникает противоЭДС E , уменьшающая ток. При этом пусковой реостат полностью выводят из цепи якоря, иначе он будет нагреваться от потерь энергии.

Все электродвигатели обладают свойством саморегулирования – автоматически создавать вращающий момент M , равный моменту статического сопротивления на валу $M_{ст}$, когда частота вращения устанавливается неизменной ($n = \text{const}$). Из уравнения (8.2) следует, что если $M_{ст} > M$, то появляется отрицательное ускорение $dn/dt < 0$ и частота вращения якоря начинает падать. Но вместе с тем уменьшается противоЭДС $E = C_E n \Phi$, а ток якоря $I_{я} = (U - E)/R_{я}$ и вращающий момент $M = C_M \Phi I_{я}$ возрастают. Когда M станет равным возросшему моменту сопротивления $M_{ст}$, dn/dt станет равным нулю и установится новое, меньшее значение частоты вращения якоря. Следовательно, при работающем двигателе ток якоря ($I_{я} = M/C_M \Phi$) определяется моментом на валу и магнитным потоком возбуждения.

Реверс двигателя постоянного тока, как правило, осуществляется изменением полярности питания цепи якоря или цепи возбуждения.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Для двигателя постоянного тока типа П-32М, установленного на лабораторном стенде, выписать паспортные данные P_H , U_H , I_H , n_H .

2.2. Собрать на стенде схему испытаний двигателя с параллельным возбуждением, представленную на рис. 8.3.

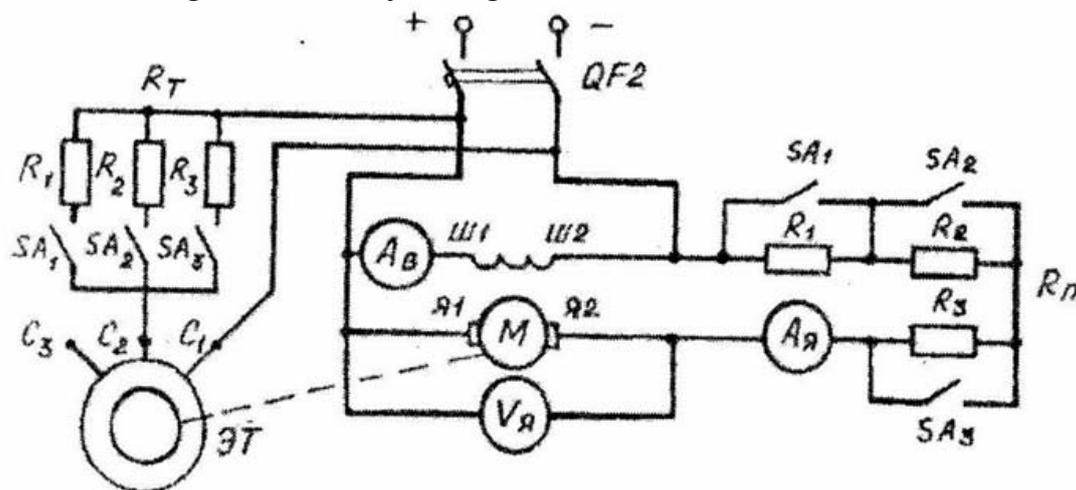


Рис. 8.3. Схема испытаний двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

2.3. Подготовить стробоскопический тахометр для измерения частоты вращения вала двигателя.

2.4. После проверки правильности сборки схемы и готовности к работе стробоскопического тахометра запустить двигатель, включив автоматический выключатель $QF2$.

2.5. Включая поочередно переключатели $SA1$, $SA2$ и $SA3$ пускового реостата R_n , вывести его из якорной цепи двигателя.

2.6. Снять показания электроизмерительных приборов и частоты вращения якоря при следующих значениях тормозного сопротивления:

- 1) $R_T = \infty$ (разомкнуты $SA1$, $SA2$, $SA3$ R_T);
- 2) $R_T = R_1$ (замкнут $SA1$ R_T);
- 3) $R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (замкнуты $SA1$ и $SA2$ R_T);
- 4) $R_T = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$ (замкнуты все переключатели R_T).

Полученные данные занести в табл.8.1.

Таблица 8.1

Результаты испытаний двигателя постоянного тока
с параллельным возбуждением

№ п/п	Измерено				Вычислено					
	U	$I_{я}$	$I_{н}$	n	$P_{эм}$	M	M_2	P_2	P_1	η
	В	А	А	об/мин	Вт	Н·м	Н·м	Вт	Вт	%

Примечание. В табл. 8.1 значения напряжения питания U соответствуют показаниям вольтметра $V_{я}$.

Расчетные формулы:

– электромагнитной мощности двигателя $P_{эм} = UI_{я} - I_{я}^2 R_{я}$. Здесь $R_{я} = \frac{U}{I_{н}} 0,5(1 - \eta_{н})$, а номинальный КПД $\eta_{н} = 0,73$;

– электромагнитного момента $M = 9,55 \frac{R_{эм}}{n}$;

– полезного момента $M_2 = M - M_0 = M - 0,04M_{н}$;

– полезной мощности на валу двигателя: $P_2 = 0,1047M_2n$;

– электрической мощности, подводимой к двигателю: $P_1 = U(I_{я} + I_{н})$;

– коэффициента полезного действия $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$.

2.7. По данным табл.8.1 построить механическую характеристику двигателя $n=f(M)$ и рабочие характеристики (рис.8.4 и 8.5). При построении механической характеристики частоту вращения холостого хода следует рассчитывать по формуле

$$n_0 = n_{н} \frac{U_{н}}{U_{н} - I_{н} R_{я}}$$

Естественная характеристика двигателя представляет собой прямую, проходящую через точки $(n_0, 0)$ и $(n_{н}, M_{н})$.



Рис.8.4. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

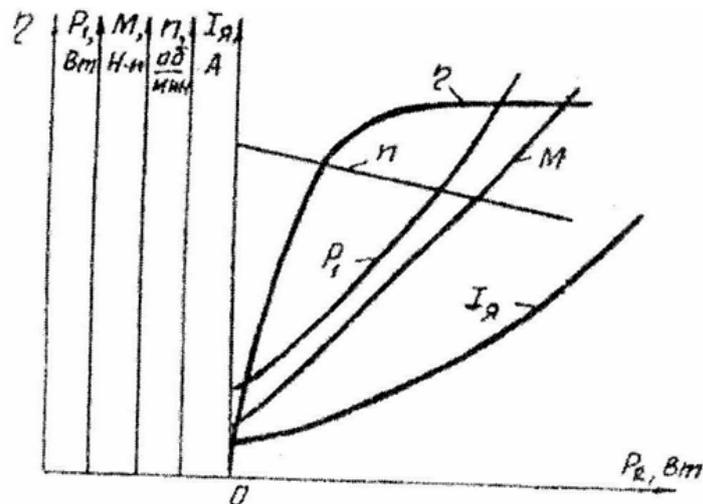


Рис.8.5. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

2.8. Сделать выводы о соответствии полученных экспериментальных данных теоретическим положением.

Контрольные вопросы

1. Особенности конструкции электрических машин постоянного тока. Их достоинства и недостатки.
2. Принцип работы двигателя постоянного тока.
3. Способы возбуждения двигателя постоянного тока.
4. Написать уравнение баланса мощностей и пояснить его физический смысл.
5. Почему при запуске двигателя постоянного тока используется пусковой реостат?
6. Начертить механическую характеристику двигателя и пояснить процесс выхода двигателя на естественную характеристику.

Лабораторная работа №9 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: исследовать статические характеристики биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, изучить определение параметров биполярного транзистора по статическим характеристикам.

Лабораторное задание

1. Снять и построить статические входные и выходные характеристики биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером.

2. По экспериментальным статическим характеристикам биполярного транзистора определить параметры для заданной рабочей точки.

1. Общие теоретические сведения

Рассмотрим статические входные и выходные характеристики биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером (рис.9.1).

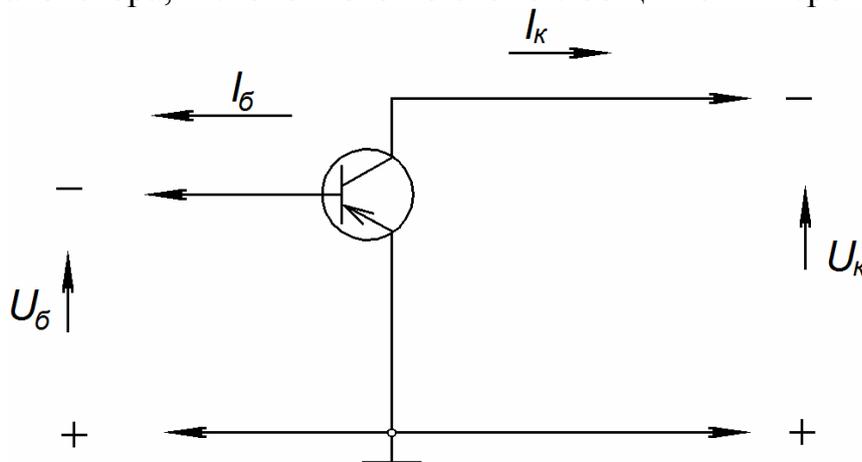


Рис. 9.1. Схема с общим эмиттером

1. *Статические входные характеристики* (рис. 9.2,а).

Они представляют собой зависимость тока базы I_b от напряжения на базе U_b (между базой и эмиттером) при постоянном напряжении на коллекторе U_k (между коллектором и эмиттером), т.е. I_c при $U_k = \text{const}$.

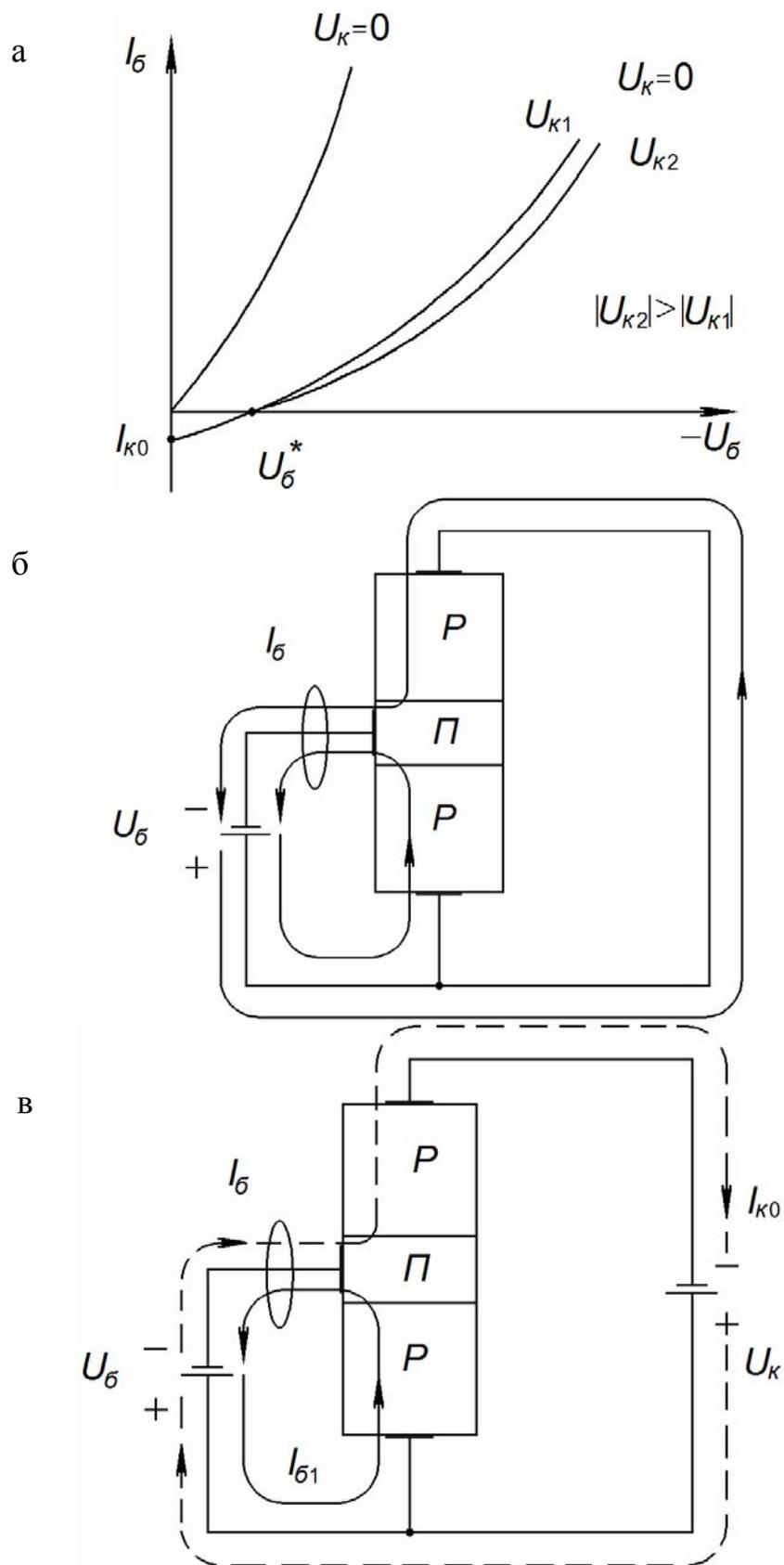


Рис. 9.2. Статические входные характеристики (а);
схема, поясняющая характеристики (б);
схема, поясняющая входные характеристики (в)

При $U_k=0$ между коллектором и эмиттером имеет место короткое замыкание, а отрицательное напряжение U_6 является прямым по отношению к эмиттерному и коллекторному $p-n$ переходам (см. рис. 9.2,б). Через оба перехода текут прямые токи, которые образуют ток базы I_6 . Такое направление тока базы считается положительным. С ростом модуля напряжения U_6 увеличиваются прямые токи переходов и ток I_6 .

При C_0 входная характеристика смещается вправо. Это можно объяснить следующим образом. В зависимости от соотношения отрицательных напряжений U_6 и U_k коллекторный переход может быть закрыт или открыт для основных носителей. Пусть по модулю напряжение U_k превышает модуль любого напряжения U_6 . В этом случае коллекторный переход независимо от величины U_6 включён в обратном направлении (рис.9.2,в). Если напряжение $U_6 = 0$, что соответствует короткому замыканию между базой и эмиттером, то эмиттерный переход закрыт, и в цепях базы и коллектора протекает обратный ток коллекторного перехода $I_6 = -I_{ко}$ (пунктирная линия на рис. 9.2,в). При отрицательном напряжении на базе U_6 эмиттерный переход открывается. В цепи базы протекает ток I_{61} , который противоположен по направлению току $I_{ко}$ (см. рис. 9.2,в). По мере роста модуля напряжения U_6 ток I_{61} увеличивается. При $U_6 = U_6^*$ токи I_{61} и $I_{ко}$ сравниваются ($I_6 = 0$), а при дальнейшем увеличении модуля напряжения U_6 ток I_{61} становится намного больше тока $I_{ко}$, и ток базы определяется током I_{61} . Таким образом, сдвиг характеристики вправо определяется током $I_{ко}$. С ростом модуля отрицательного напряжения U_k уменьшается ток базы, так как увеличивается потенциальный барьер коллекторного перехода, что сокращает время пребывания дырок, пришедших в базу из эмиттера, которые втягиваются полем коллекторного перехода в коллектор. Это приводит к ещё большему смещению характеристики вправо. Однако, поскольку влияние напряжения U_k на ток I_{61} весьма мало, то различие по входным характеристикам, снятым при U_{k1} и U_{k2} будет незначительным (см. рис 9.2,а).

2. Выходные характеристики (рис 9.3,а).

Это зависимость $I_k = f(U_k)$ при $I_6 = \text{const}$. Как уже отмечалось, при $U_6 = 0$ эмиттерный переход закрыт и в цепях базы и коллектора протекает обратный ток коллекторного перехода $I_{ко}$ за счёт действия напряжения U_k . Когда на базу подаётся отрицательное напряжение U_6 , эмиттерный переход открывается. В цепи базы потечёт ток базы I_{61} , а в цепи коллектора

ток $I_{к1}$, определяемый движением дырок из эмиттера в базу, а затем в коллектор (рис. 9.3,б).

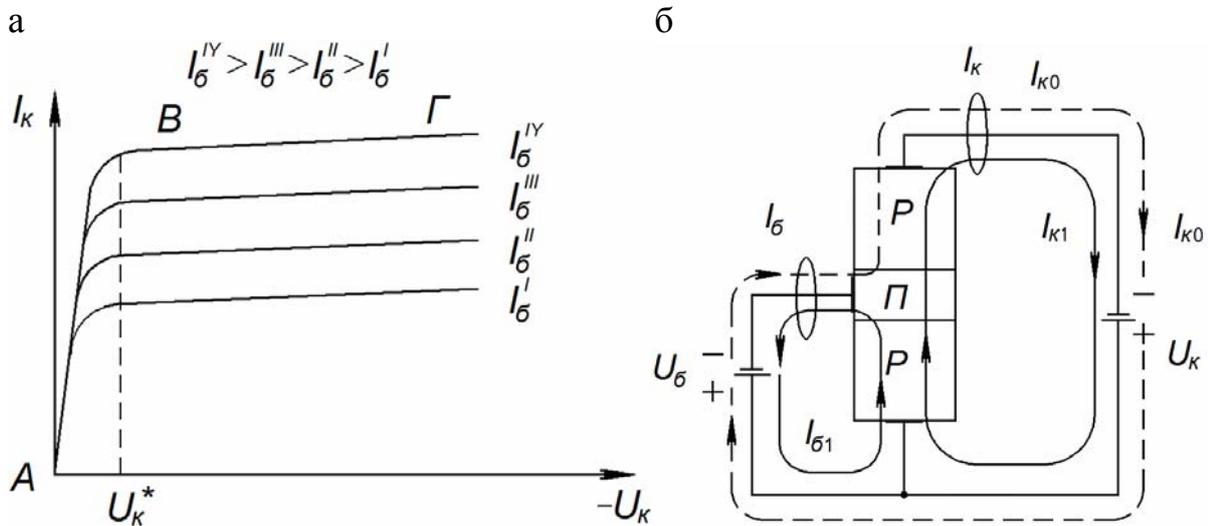


Рис.9.3. Схема, поясняющая статические выходные характеристики (а); выходные характеристики (б)

Рассмотрим теперь одну из характеристик семейства, например, соответствующую значению $I_б = I_б^4$. Характеристика имеет два специфических участка АВ и ВГ. Так как напряжение $U_б < 0$, то при $U_к = 0$, как уже отмечалось, оба перехода транзистора открыты. Прямой ток коллекторного перехода направлен навстречу потоку дырок, движущихся из эмиттера в базу, а затем в коллектор и при их компенсации $I_к = 0$. В этом случае характеристика начинается из начала координат. Изменение напряжения $U_к$ в пределах от 0 до $|U_к^*|$ вызывает резкое уменьшение прямого тока коллекторного перехода и увеличение тока коллектора, обусловленного движением дырок из эмиттера в базу, а затем в коллектор. При $|U_к| \geq |U_к^*|$, т.е. когда $|U_к| \geq |U_б|$ коллекторный переход закрывается, прямой ток коллекторного перехода становится равным нулю. На участке ВГ увеличение тока $I_к$ при увеличении модуля напряжения $U_к$ объясняется двумя причинами. Во-первых, увеличивается поле коллекторного перехода, что сокращает время пребывания дырок в базе. Во-вторых, увеличивается по модулю напряжение на базе, так как транзистор представляет для напряжения $U_к$ делитель напряжения, состоящий из двух последовательно соединённых переходов. Между токами $I_б$ и $I_к$ имеется прямая связь. Чем больше по модулю напряжение $U_б$, тем больше открыт эмиттерный переход и больше дырок поступает из эмиттера в базу, увеличивая ток базы, а также

из базы в коллектор, увеличивая ток коллектора. Следовательно, большему току I_6 соответствует больший ток I_k , и характеристики смещаются вверх.

Рассмотрим статические параметры биполярного транзистора. Из этих параметров наибольшее применение находят h -параметры, на которых и остановимся применительно к схеме с общим эмиттером. К наиболее часто используемым h -параметрам относятся:

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_6}{\Delta I_6} | U_k = \text{const} - \text{входное сопротивление транзистора};$$

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} | U_k = \text{const} - \text{коэффициент усиления по току};$$

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_k} | I_6 = \text{const} - \text{выходная проводимость транзистора};$$

$$R_i = \frac{1}{h_{22Э}} = \frac{\Delta U_k}{\Delta I_k} | I_6 = \text{const} - \text{выходное сопротивление транзистора};$$

$$S = \frac{h_{21Э}}{h_{11Э}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_6} | U_k = \text{const} - \text{крутизна}.$$

Эти параметры определяются по статическим характеристикам транзистора для определённой рабочей точки.

Описание лабораторной установки

На рис. 9.4, 9.5 приведены функциональная и принципиальная схемы эксперимента для исследования статического режима работы биполярного транзистора. Функциональная схема эксперимента содержит:

- макет для снятия статических характеристик биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером;
- биполярный, маломощный, низкочастотный транзистор;
- источник питания с $U = 1,3 \text{ В}$;
- источник питания с $U = 15 \text{ В}$ (см. рис. 9.4);
- измерительные комбинированные приборы;
- соединительные проводники.



Рис. 9.4. Функциональная схема эксперимента

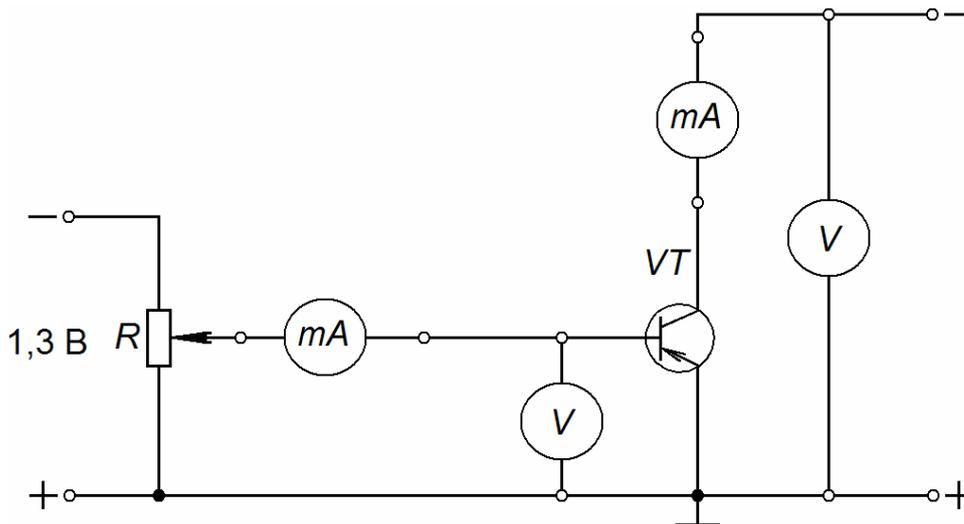


Рис. 9.5. Схема для исследования биполярного транзистора

На лабораторном макете есть ряд гнезд для подключения источников питания и измерительных приборов для измерения токов и напряжений транзистора (см. рис. 9.5).

Напряжение на коллектор подаётся с регулируемого источника питания, имеющего максимальное напряжение $U = 15 \text{ В}$. Напряжение на базу подаётся с источника питания, имеющего напряжение $U = 1,3 \text{ В}$.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с применяемой аппаратурой и измерительными приборами.

2.2. Собрать схему эксперимента (см. рис. 9.5) для снятия статических характеристик биполярного транзистора и после проверки схемы преподавателем включить источник питания.

2.3. Снять семейство входных характеристик транзистора, для чего следует:

- установить напряжение на коллекторе, указанное в табл. 9.1;
- изменяя резистором R , расположенным на макете, напряжение на базе от 0 до 0,2 В при $U_{\text{к}} = 0$ и от 0 до 0,25 В при $U_{\text{к1}} = -5 \text{ В}$, $U_{\text{к2}} = -10 \text{ В}$, снять семейство входных характеристик биполярного транзистора $I_{\text{б}} = f(U_{\text{б}})$ при $U_{\text{к}} = \text{const}$.

Результаты измерений занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

$I_{\bar{6}} = f(U_{\bar{6}})$ при $U_{\text{к}} = \text{const}$						$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к}})$ при $I_{\bar{6}} = \text{const}$					
$U_{\text{к}} = 0 \text{ В}$		$U_{\text{к}} = -5 \text{ В}$		$U_{\text{к}} = -10 \text{ В}$		$I_{\bar{6}} = 100 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 200 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 300 \text{ мкА}$	
$U_{\bar{6}}$	$I_{\bar{6}}$	$U_{\bar{6}}$	$I_{\bar{6}}$	$U_{\bar{6}}$	$I_{\bar{6}}$	$U_{\text{к}}$	$I_{\text{к}}$	$U_{\text{к}}$	$I_{\text{к}}$	$U_{\text{к}}$	$I_{\text{к}}$
В	мкА	В	мкА	В	мкА	В	мА	В	мА	В	мА

2.4. Снять семейство статических выходных характеристик транзистора, для чего следует:

- установить резистором R ток в цепи базы, указанный в табл. 9.1;
- изменяя напряжение на коллекторе следующим образом: 0 В, 0,3 В, 0,6 В, 1 В, 3 В, 5 В, 7 В, снять семейство выходных характеристик транзистора.

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к}}) \text{ при } I_{\bar{6}} = \text{const}.$$

При измерении для каждой выходной характеристики поддерживать ток базы постоянным.

Результаты измерений занести в табл. 9.1.

2.5. По данным табл. 9.1 построить семейства статических входных и выходных характеристик биполярного транзистора.

2.6. В рабочей точке $I_{\bar{6}} = 200 \text{ мкА}$, $U_{\text{к}} = -5 \text{ В}$ определить статические параметры биполярного транзистора:

$$h_{11\bar{6}} = \frac{\Delta U_{\bar{6}}}{\Delta I_{\bar{6}}} |_{U_{\text{к}}=\text{const}(\text{Ом})}; R_i = \frac{1}{h_{22\bar{6}}} = \frac{\Delta U_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{к}}} |_{I_{\bar{6}}=\text{const}(\text{Ом})};$$

$$h_{21\bar{6}} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\bar{6}}} |_{U_{\text{к}}=\text{const}}; S = \frac{h_{21\bar{6}}}{h_{11\bar{6}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\bar{6}}} |_{U_{\text{к}}=\text{const}}(\text{А/В}).$$

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень приборов.
3. Функциональная схема эксперимента.
4. Результаты исследований и построенные статические входные и выходные характеристики.
5. Результаты расчёта статических параметров.
6. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Нарисовать схему включения с общим эмиттером, показать направления токов базы и коллектора.
2. Какой вид имеют статические входные характеристики биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером? Почему с ростом модуля напряжения базы растёт ток базы?
3. Какой вид имеют статические выходные характеристики биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером? Почему для большего тока базы характеристики смещаются вверх?
4. Как выражается параметр S и как его определить по статическим характеристикам в определённой рабочей точке?
5. Как выражается параметр R_i и как его определить по статическим характеристикам в определённой рабочей точке?
6. Как выражается параметр $h_{21Э}$ и как его определить по статическим характеристикам в определённой рабочей точке?
7. Как выражается параметр $h_{21Э}$ и как его определить по статическим характеристикам в определённой рабочей точке?

Лабораторная работа №10

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ЗАТВОРОМ В ВИДЕ $p-n$ -ПЕРЕХОДА

Цель работы: исследовать статические характеристики полевого транзистора с затвором в виде $p-n$ -перехода, изучить определение параметров полевого транзистора по статическим характеристикам.

Лабораторное задание

1. Снять и построить статические входные и выходные характеристики полевого транзистора с затвором в виде $p-n$ -перехода.
2. По экспериментальным статическим характеристикам полевого транзистора определить параметры для заданной рабочей точки.

1. Общие теоретические сведения

Рассмотрим статические характеристики полевого транзистора с затвором в виде $p-n$ -перехода с каналом p -типа.

1. *Выходные характеристики* (рис.10.1).

Это зависимость тока стока I_c от напряжения стока U_c при постоянном напряжении на затворе U_3 , т.е. $I_c = f(U_c)$ при $U_3 = \text{const}$.

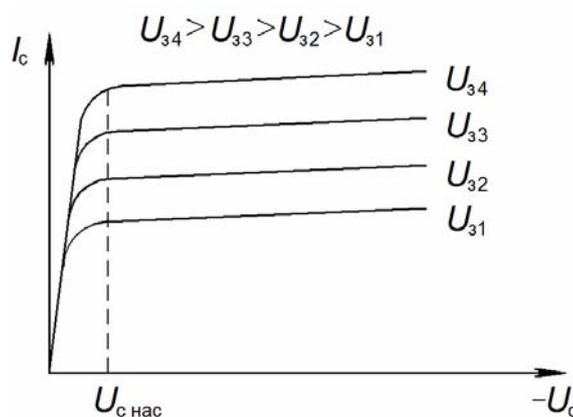


Рис. 10.1. Выходные характеристики полевого транзистора с затвором в виде $p-n$ перехода с каналом p -типа

Конструкция полевого транзистора с затвором в виде $p-n$ -перехода с каналом p -типа и схема для снятия статических характеристик даны на рис. 10.2,а, б.

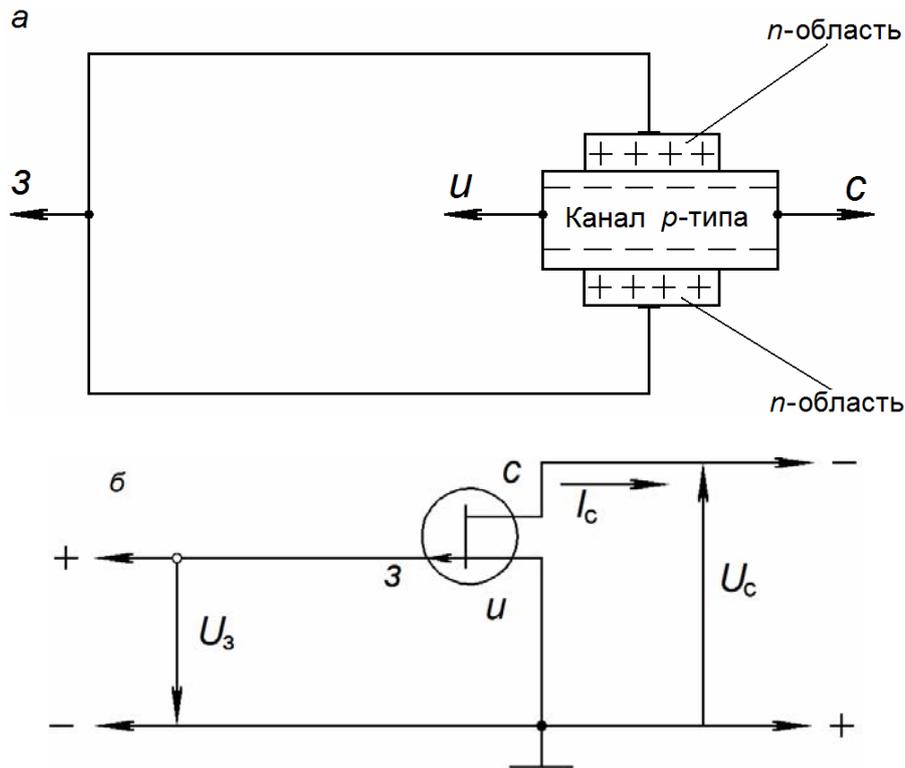


Рис. 10.2. Конструкция (а) и схема включения полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа (б)

Начальный участок выходной характеристики определяется в основном омическим сопротивлением канала. Затем, начиная с определённого значения $U_c = U_{c\text{нас}}$, наступает режим насыщения, и характеристика идёт полого.

Ток стока I_c образует падение напряжения на сопротивлении материала канала. Это падение напряжения изменяется от $U = 0$ около истока и до $U = -U_c$ возле стока. Вследствие этого сечение канала по длине будет переменным, так как обратное включение p - n переходов будет образовано не только за счёт напряжения затвора U_3 , но и за счёт падения напряжения в толще канала. Поэтому ширина p - n переходов от истока к стоку будет увеличиваться, а сечение канала, наоборот, суживаться. С увеличением тока I_c обеднённые дырками области расширяются, а ширина канала уменьшается. При $U_c = U_{c\text{нас}}$ обеднённые дырками области смыкаются у стокового конца, и дальнейший рост тока стока I_c с ростом напряжения стока U_c практически прекращается. Когда напряжение затвора U_3 увеличивается, увеличивается ширина p - n -переходов, канал сужается, ток I_c уменьшается и выходные характеристики смещаются вниз.

2. Входные (стоко-затворные) характеристики (рис. 10.3).

Они представляют собой зависимость тока стока I_c от напряжения затвора U_3 при постоянном напряжении стока U_c , т.е.

$$I_c = f(U_3) \text{ при } U_c = \text{const.}$$

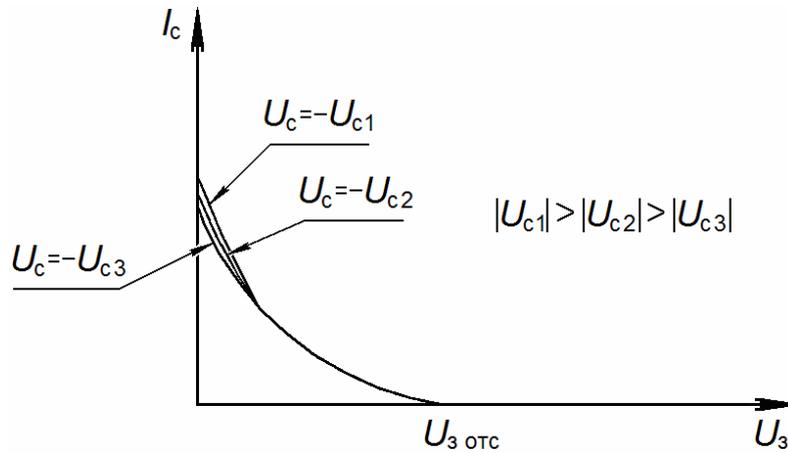


Рис. 10.3. Входные (стоко-затворные) характеристики полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа

При $U_3 = U_{3 \text{ отс}}$ (напряжение отсечки) ток I_c становится равным нулю. Так как в области насыщения ток стока I_c почти не зависит от изменения напряжения стока U_c , то входные характеристики, снятые при разных напряжениях U_c , почти сливаются вместе.

Рассмотрим статические параметры полевого транзистора.

В качестве основных статических параметров полевого транзистора используют:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_3} | U_c = \text{const} \text{ — крутизна;}$$

$$R_i = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} | U_3 = \text{const} \text{ — выходное сопротивление;}$$

$$\mu = S \cdot R_i = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_3} | I_c = \text{const} \text{ — коэффициент усиления.}$$

Эти параметры определяются по статическим характеристикам транзистора в определённой рабочей точке.

Описание лабораторной установки

На рис. 10.4, 10.5 приведены функциональная и принципиальная схемы эксперимента для исследования статического режима работы полевого транзистора. Функциональная схема эксперимента (рис.10.4) содержит:

– макет для снятия статических характеристик полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа;

- полевой транзистор с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа;
- источник питания $U = 1,3 \text{ В}$;
- источник питания $U = 15 \text{ В}$;
- измерительные комбинированные приборы;
- соединительные проводники.



Рис. 10.4. Функциональная схема эксперимента

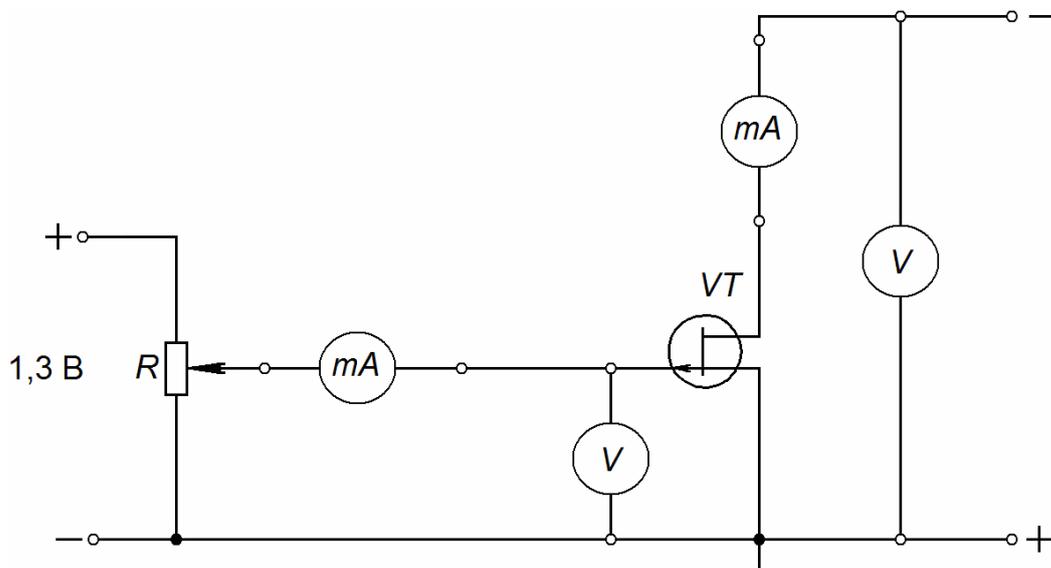


Рис. 10.5. Схема для исследования полевого транзистора

На лабораторном макете имеется ряд гнезд для подключения источников питания и измерительных приборов для измерения напряжений U_3 , U_c и тока I_c транзистора (см. рис. 10.5).

Напряжение на сток транзистора подаётся с регулируемого источника питания, имеющего максимальное напряжение $U = 15 \text{ В}$. Напряжение на затвор транзистора подаётся с источника питания, имеющего напряжение $U = 1,3 \text{ В}$.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с применяемой аппаратурой и измерительными приборами.

2.2. Собрать схему эксперимента (см. рис. 10.5) для снятия статических характеристик биполярного транзистора и после проверки схемы преподавателем включить источник питания.

2.3. Снять семейство выходных характеристик полевого транзистора, для чего следует:

– установить напряжение на затворе, указанное в табл. 10.1, с помощью потенциометра R , расположенного на макете;

Т а б л и ц а 10.1

$I_c = f(U_c)$ при $U_3 = \text{const}$						$I_c = f(U_3)$ при $U_c = \text{const}$					
$U_3 = 0 \text{ В}$		$U_3 = 0,2 \text{ В}$		$U_3 = 0,4 \text{ В}$		$U_c = -5 \text{ В}$		$U_c = -10 \text{ В}$		$U_c = -15 \text{ В}$	
U_c	I_c	U_c	I_c	U_c	I_c	U_3	I_c	U_3	I_c	U_3	I_c
В	мА	В	мА	В	мА	В	мА	В	мА	В	мА

– изменяя напряжение на стоке следующим образом: 0 В, 0,3 В, 0,6 В, 1 В, 3 В, 5 В, 10 В, снять семейство выходных характеристик $I_c = f(U_c)$ при $U_3 = \text{const}$.

Результаты измерений занести в табл. 10.1.

2.4. Снять входные (стоко-затворные) характеристики полевого транзистора, для чего следует:

– установить напряжение на стоке, указанное в табл. 10.1;

– изменяя напряжение на затворе от 0 В (при максимальном значении тока стока) через 0,2 В до напряжения отсечки (при котором ток стока равен нулю), снять входные характеристики $I_c = f(U_3)$ при $U_c = \text{const}$. Результаты измерений занести в табл. 10.1.

2.5. По данным табл. 10.1 построить статические входные и выходные характеристики полевого транзистора.

2.6. В рабочей точке $U_c = -5 \text{ В}$, $U_3 = 0,2 \text{ В}$ определить статические параметры полевого транзистора:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_3} | U_c = \text{const} \text{ (A/V)};$$

$$R_i = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} | U_3 = \text{const} \text{ (Ом)}.$$

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень приборов.
3. Функциональная схема эксперимента.

4. Результаты исследований и построенные статические входные и выходные характеристики.
5. Результаты расчёта статических параметров.
6. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Нарисовать схему включения полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа, показать направление тока стока.
2. Какой вид имеют выходные статические характеристики полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа? Почему с увеличением напряжения затвора характеристики смещаются вниз?
3. Какой вид имеют входные (стоко-затворные) статические характеристики полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода с каналом p -типа? Почему с ростом напряжения затвора ток стока уменьшается?
4. Как выражается параметр S и как его определить по статическим характеристикам в определённой рабочей точке?
5. Как выражается параметр R_i и как его определить по статическим характеристикам в определённой рабочей точке?

Лабораторная работа №11

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы: исследовать влияние параметров резисторного усилителя на транзисторе на частотную и амплитудную характеристики усилителя, а также влияние отрицательной обратной связи на коэффициент усиления и полосу пропускания усилителя.

Лабораторное задание

1. Снять и построить частотные характеристики резисторного усилителя при различных параметрах разделительного конденсатора и паразитной ёмкости; определить полосу пропускания.
2. Снять и построить амплитудные характеристики резисторного усилителя при различных сопротивлениях коллекторной нагрузки.
3. Исследовать работу усилителя с отрицательной обратной связью.

1. Общие теоретические сведения

Резисторный усилитель предназначен для усиления входного напряжения по амплитуде. Амплитуда выходного напряжения усилителя $U_{\text{ВЫХ Т}}$ больше амплитуды входного напряжения $U_{\text{ВХ Т}}$ в K раз, где K – коэффициент усиления усилителя.

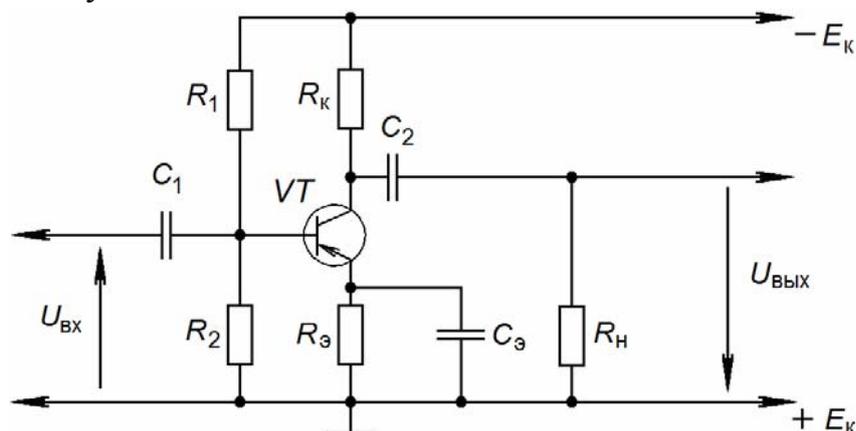


Рис. 11.1. Принципиальная схема резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе с эмиттерной стабилизацией рабочей точки

В лабораторной работе исследуется схема резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе с эмиттерной стабилизацией рабочей точки (рис. 11.1).

Рассмотрим назначение элементов схемы. Пусть данный усилитель является каскадом в многокаскадном усилителе. Резистор R_k является коллекторной нагрузкой транзистора. Он обеспечивает режим усиления или динамический режим работы транзистора.

Конденсатор $C_2(C_1)$ является разделительным. Этот конденсатор разделяет по постоянной составляющей базу транзистора последующего каскада, имеющую низкий потенциал, от коллектора транзистора предыдущего каскада, имеющего высокий потенциал, и служит для передачи переменного напряжения с коллектора предыдущего транзистора на базу последующего.

Резисторы R_1, R_2 образуют делитель напряжения. С помощью этого делителя между базой и эмиттером создаётся постоянное отрицательное напряжение U_{60} , задающее линейный режим работы (режим «А»), когда при изменении входного напряжения, выходное напряжение изменяется пропорционально входному.

Цепь R_3, C_3 является цепью отрицательной обратной связи по постоянному току. Цепь стабилизирует постоянный ток коллектора. Для устранения обратной связи по переменному току резистор R_3 шунтируется конденсатором C_3 .

E_k – ЭДС источника питания.

R_n – нагрузка усилителя.

Усилитель работает следующим образом. Когда на базу транзистора через конденсатор C_1 подаётся небольшое переменное входное напряжение, ток коллектора значительно изменяется. В связи с этим резко перераспределяются по величине напряжения на коллекторе (между коллектором и эмиттером транзистора) и на коллекторной нагрузке R_k . На коллекторе появляется значительное переменное коллекторное напряжение, которое через конденсатор C_2 поступает на нагрузку R_n , образуя выходное напряжение. Напряжение на выходе по величине больше входного и сдвинутого относительно входного на 180° .

Рассмотрим характеристики усилителя. Частотная характеристика показана на рис. 11.2. Частотной характеристикой называется зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты входного напряжения, т.е. $K = \varphi(f)$.

С уменьшением частоты входного напряжения увеличивается сопротивление разделительного конденсатора C_2 . Это приводит к тому, что на конденсаторе C_2 выделяется часть переменного коллекторного напряжения и эта часть растёт с уменьшением частоты. Следовательно, напряжение на нагрузке R_n , т.е. выходное напряжение и коэффициент усиления будут уменьшаться.

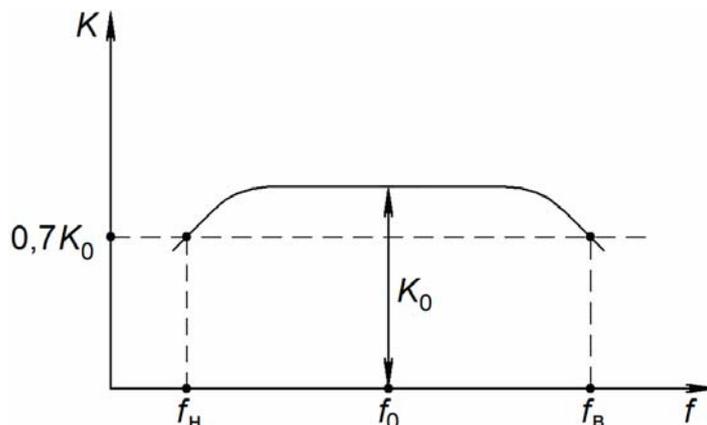


Рис. 11.2. Частотная характеристика резисторного усилителя

С повышением частоты входного напряжения будет уменьшаться сопротивление паразитной ёмкости C_0 , которая образуется на выходе параллельно нагрузке R_H . Поэтому будут уменьшаться выходное сопротивление усилителя, выходное напряжение и коэффициент усиления. На уровне $0,7K_0$, где K_0 – коэффициент усиления на средних участках, можно определить частотный диапазон усилителя от f_H до f_B .

Коэффициент усиления в области средних частот определяется следующей формулой:

$$K_0 = S \cdot R_0,$$

где S – крутизна транзистора;

$$R_0 = \frac{R_k \cdot R_i \cdot R_H}{R_i \cdot R_H + R_k \cdot R_H + R_k \cdot R_i};$$

R_i – выходное сопротивление транзистора.

Амплитудная характеристика усилителя представлена на рис. 11.3.

Амплитудная характеристика есть зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного, т.е.

$$U_{\text{ВЫХ Т}} = \varphi(U_{\text{ВХ Т}}).$$

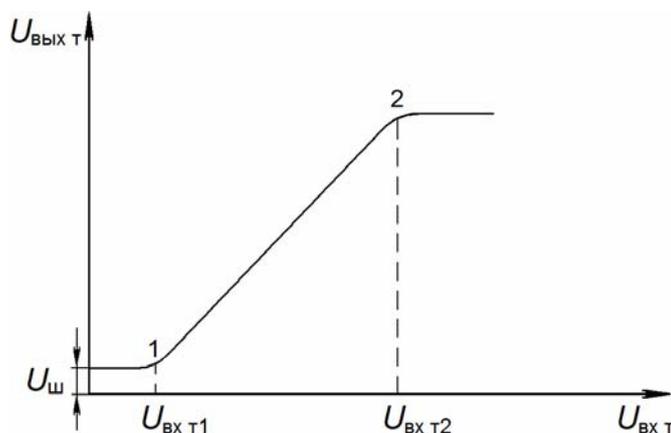


Рис. 11.3. Амплитудная характеристика усилителя

При входных напряжениях $U_{\text{вх Т}} < U_{\text{вх Т1}}$ амплитудная характеристика определяется шумами усилителя, а при $U_{\text{вх Т}} > U_{\text{вх Т2}}$ – перегрузками транзистора. Линейный участок характеристики определяет диапазон изменения амплитуды входного напряжения от $U_{\text{вх Т1}}$ до $U_{\text{вх Т2}}$.

Если в цепи обратной связи R_3, C_3 отключить конденсатор C_3 , то возникает отрицательная обратная связь по переменному току. В лабораторной работе исследуется влияние на частотную характеристику этой обратной связи, которая приводит к тому, что уменьшается коэффициент усиления, но увеличивается частотный диапазон усилителя.

Описание лабораторной установки

На рис. 11.4, 11.5 приведены функциональная и принципиальная схемы эксперимента для исследования резисторного усилителя напряжения на транзисторе.



Рис. 11.4. Функциональная схема эксперимента

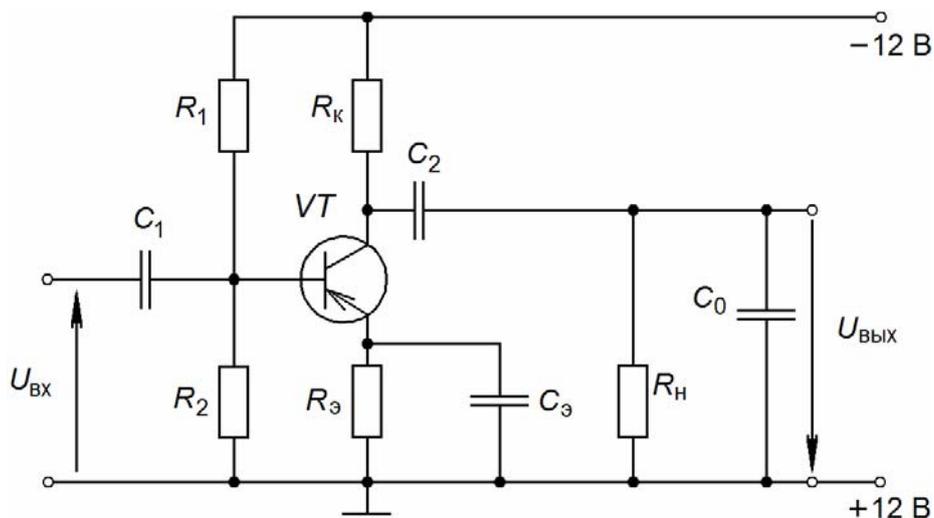


Рис. 11.5. Принципиальная схема макета резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе с эмиттерной стабилизацией рабочей точки

Функциональная схема макета содержит:

- макет для исследования резисторного усилителя напряжения на транзисторе;
- источник питания с напряжением $U = -12 \text{ В}$;
- измерительный генератор типа ГЗ;
- электронный вольтметр типа ВЗ (В7);
- соединительные проводники.

На лабораторном макете собрана схема резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе с эмиттерной стабилизацией рабочей точки.

На лабораторном макете собрана схема, позволяющая исследовать влияние параметров элементов схемы и отрицательной обратной связи на частотную и амплитудную характеристики усилителя. На макете имеется ряд гнезд, с помощью которых к макету подсоединяются источник питания и измерительные приборы. Контроль входного напряжения осуществляется электронным вольтметром, расположенным на передней панели генератора ГЗ. Измерение выходного напряжения осуществляется электронным вольтметром типа ВЗ (В7), который подключается к выходу усилителя.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с применяемой аппаратурой и измерительными приборами.

2.2. Собрать функциональную схему эксперимента согласно рис. 11.4. После проверки схемы преподавателем включить источник питания и измерительные приборы.

2.3. Исследовать частотные характеристики усилителя, для чего:

– подать на вход усилителя с генератора ГЗ напряжение, равное 20 мВ;

– с помощью тумблера установить нагрузку в коллекторной цепи $R_k = 1,2 \text{ кОм}$;

– с помощью тумблера подключить разделительный конденсатор с ёмкостью $C_2 = 1 \text{ мкФ}$ на выходе усилителя;

– с помощью тумблера подключить эквивалент паразитной ёмкости $C_0 = 0,05 \text{ мкФ}$;

– изменяя частоту генератора ГЗ от 20 Гц до 100 Гц, снять частотную характеристику усилителя, т.е. $K = \varphi(f)$.

Измерения проводить на частотах: 20 Гц, 50 Гц, 100 Гц, 400 Гц, 1 кГц, 2 кГц, 6 кГц, 10 кГц, 50 кГц, 100 кГц. Напряжение на выходе измерять электронным вольтметром ВЗ (В7). Повторить измерения и снять

вторую частотную характеристику, установив ёмкость разделительного конденсатора $C_2=10$ мкФ и эквивалент паразитной ёмкости $C_0=0,01$ мкФ.

Результаты измерений занести в табл. 11.1, где указаны параметры элементов схемы усилителя, для которых снимаются частотные характеристики.

Т а б л и ц а 11.1

$U_{вх} = 20$ мВ, $R_k = 1,2$ кОм					
$C_2=1$ мкФ, $C_0=0,05$ мкФ			$C_2=10$ мкФ, $C_0=0,01$ мкФ		
f	$U_{вых}$	K	f	$U_{вых}$	K
Гц, кГц	В		Гц, кГц	В	

2.4. Исследовать амплитудные характеристики, т.е. зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ при $f = \text{const}$ для двух значений коллекторной нагрузки: $R_k=1,2$ кОм; $R_k=750$ Ом, для чего:

- установить на генераторе ГЗ частоту, равную 1 кГц;
- установить параметры элементов схемы, указанные в табл. 11.2;
- изменяя напряжение на входе усилителя от 0 до 30 мВ через 5 мВ, снять амплитудные характеристики усилителя. Результаты измерений занести в табл. 11.2.

Т а б л и ц а 11.2

$f=1$ кГц, $C_2=10$ мкФ, $C_0=0,01$ мкФ			
$R_k=1,2$ кОм		$R_k=750$ Ом	
$U_{вх}$	$U_{вых}$	$U_{вх}$	$U_{вых}$ $U_{вых}$
мВ	В	мВ	В

2.5. По данным табл. 11.1 построить частотные характеристики и определить по ним:

- коэффициент усиления на средней частоте;
- диапазон рабочих частот.

Для построения частотных характеристик использовать бланк с полупо-
логарифмическим масштабом (рис.11.6). Объяснить полученные результаты.

2.6. По данным табл. 11.2 построить амплитудные характеристики, определить по характеристикам линейный участок и диапазон изменения входного напряжения. Объяснить полученные результаты.

2.7. Исследовать работу резисторного усилителя с отрицательной обратной связью по переменному току, для чего:

- тумблером установить нагрузку в коллекторной цепи $R_k = 12$ кОм ;

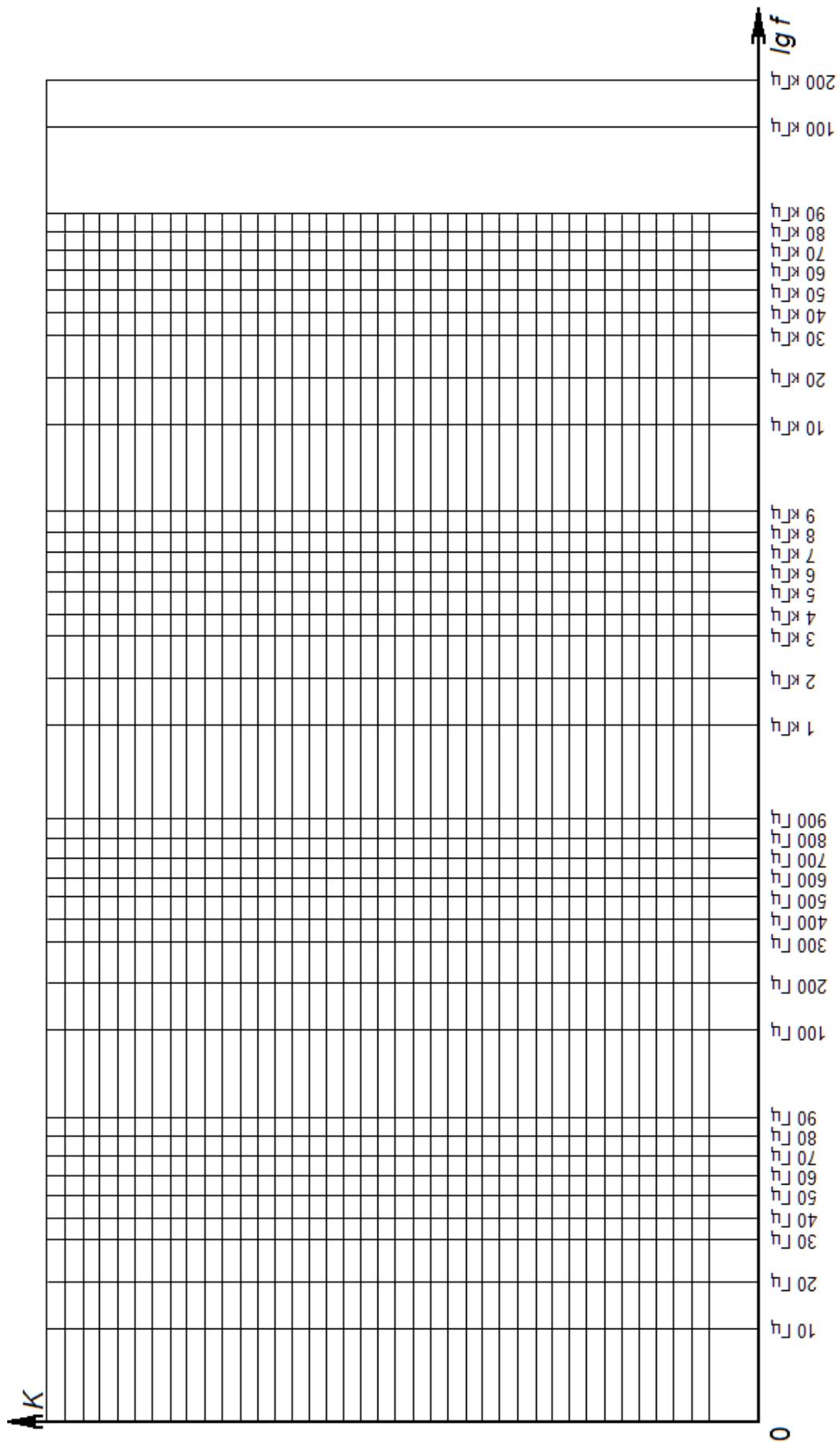


Рис. 11.6. Бланк частотной характеристики

- тумблером установить разделительный конденсатор на выходе усилителя с ёмкостью $C_2 = 1 \text{ мкФ}$;
- тумблером подключить эквивалент паразитной ёмкости $C_0 = 0,05 \text{ мкФ}$;
- тумблером выключить конденсатор C_3 , т.е. ввести отрицательную обратную связь по переменному току;
- подать на вход усилителя напряжение, равное 80 мВ;
- изменяя частоту генератора ГЗ, определить экспериментально максимальное выходное напряжение $U_{\text{вых.0}}$ (на средней частоте);
- определить выходное напряжение на нижней и верхней граничных частотах по формуле $U_{\text{вых.н}} = U_{\text{вых.в}} = 0,7U_{\text{вых.0}}$;
- изменяя частоту генератора ГЗ, установить $U_{\text{вых.н}}$ и записать соответствующую этому напряжению частоту $f_{\text{н}}$;
- изменяя частоту генератора ГЗ, установить $U_{\text{вых.в}}$ и записать соответствующую этому напряжению частоту $f_{\text{в}}$;
- полученный частотный диапазон сравнить с частотным диапазоном первой частотной характеристики, построенной по данным табл. 11.1 и сделать вывод.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень применяемых приборов.
3. Функциональная схема эксперимента.
4. Результаты исследований, графики и соответствующие объяснения.
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе с эмиттерной стабилизацией рабочей точки и объясните назначение элементов схемы.
2. Что можно определить по частотной и амплитудной характеристикам резисторного усилителя напряжения?
3. Каков принцип действия резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе?
4. Почему частотная характеристика резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе имеет спады в области низких и в области высоких частот?
5. Почему с увеличением ёмкости разделительного конденсатора C_2 частотная характеристика резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе смещается вверх в области низких частот?
6. Почему с уменьшением паразитной ёмкости C_0 частотная характеристика резисторного усилителя на биполярном транзисторе смещается вверх в области верхних частот?

Лабораторная работа №12

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Цель работы: исследовать влияние параметров элементов схемы на основные характеристики и параметры интегрального операционного усилителя (ИОУ) в различных режимах работы.

1. Общие теоретические сведения

Рассмотрим типовую схему включения операционного усилителя. Такой схемой является схема с отрицательной обратной связью по напряжению (рис. 12.1,а).

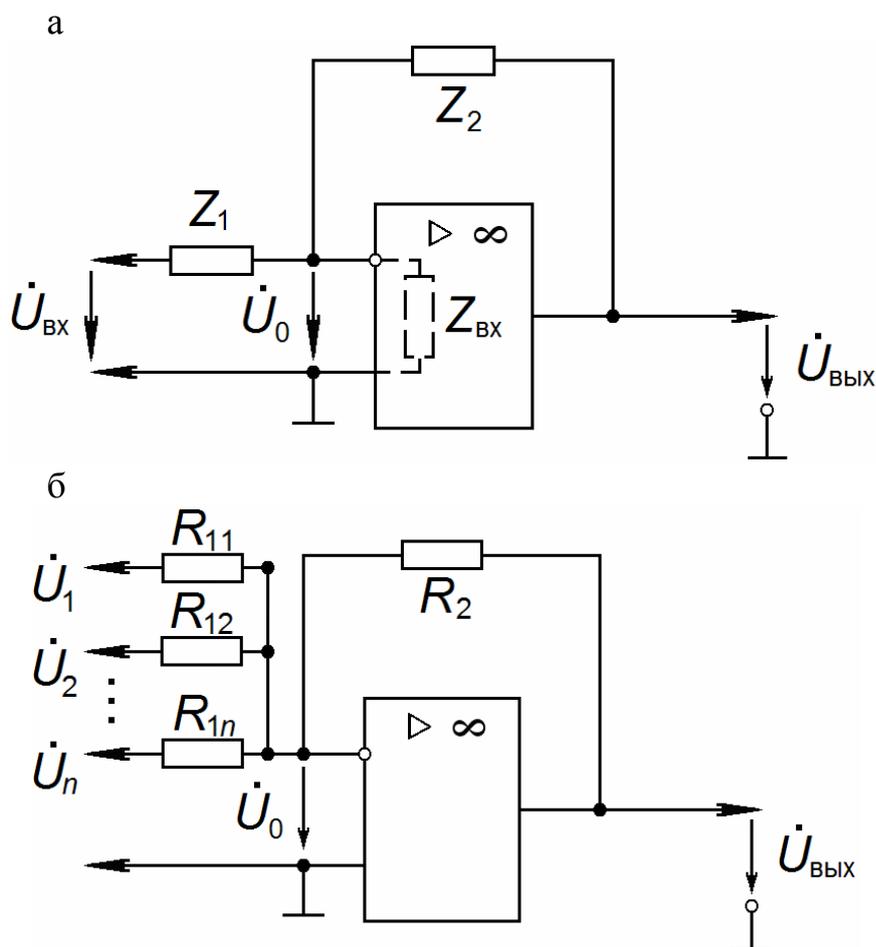


Рис. 12.1. Типовая схема включения операционного усилителя (а), суммирующий усилитель (б)

Внешние элементы – сопротивления \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 – подключаются к инвертирующему входу. Сопротивление \underline{Z}_1 включается во входную цепь, а сопротивление \underline{Z}_2 – в цепь отрицательной обратной связи.

Выходное напряжение определяется следующим выражением:

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = - \frac{\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{1 + \frac{1}{K_0} \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{\text{ВЫХ}}} \right)},$$

где $K_0 = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{U}_0$ – коэффициент усиления операционного усилителя без обратной связи;

\dot{U}_0 – напряжение, действующее непосредственно на входе усилителя;

$\underline{Z}_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление усилителя.

Знак «минус» в формуле для указывает на противофазность и .

Используя выражение , получаем формулу для коэффициента усиления операционного усилителя с отрицательной обратной связью:

$$\underline{K} = - \frac{\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}}{1 + \frac{1}{K_0} \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{\text{ВЫХ}}} \right)}.$$

Для идеального операционного усилителя, у которого $\underline{K}_0 = \infty$ и $\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} = \infty$, имеем: $\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = - \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \dot{U}_{\text{ВХ}}$; $\underline{K} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}$

Рассмотрим суммирующий усилитель.

В нём в общем случае используется n входов. Во входные цепи соответственно включаются резисторы $R_{11}, R_{11} \dots R_{1n}$, а в цепь обратной связи – резистор R_2 (рис. 12.1, б). В общем случае на вход суммирующего усилителя может быть подано n суммируемых сигналов. Выходное напряжение суммирующего усилителя зависит от каждого входного напряжения, поэтому для идеального операционного усилителя, у которого $\underline{K}_0 = \infty$, выходное напряжение

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = - \frac{R_2}{R_{11}} \check{U}_1 + \frac{R_2}{R_{12}} \check{U}_2 + \dots + \frac{R_2}{R_{1n}} \check{U}_n$$

где $\check{U}_1, \check{U}_2, \dots, \check{U}_n$ – входные напряжения.

Таким образом, суммирующий усилитель выполняет операцию сложения входных сигналов с учётом их «веса». Если на вход суммирующего усилителя подаётся только один сигнал ($n=1$), то в этом случае осуществляются перемена

знака и умножение на постоянную величину. Такой усилитель называется масштабным усилителем. Тогда

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_2}{R_1} \ddot{U}_{\text{ВХ}}; \quad \underline{K} = K = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_2}{R_1}.$$

В лабораторной работе снимаются частотная и амплитудная характеристики масштабного операционного усилителя. Эти характеристики по сравнению с соответствующими характеристиками резисторного усилителя напряжения обладают более широкими рабочими диапазонами. Частотная характеристика масштабного усилителя не имеет завала в области низких частот, так как операционный усилитель усиливает как переменный, так и постоянный сигналы.

Рассмотрим дифференцирующий усилитель. Он осуществляет дифференцирование входного сигнала по времени. Для этого во входную цепь включается конденсатор C_1 , а в цепь обратной связи – резистор R_2 (рис. 12.2,а).

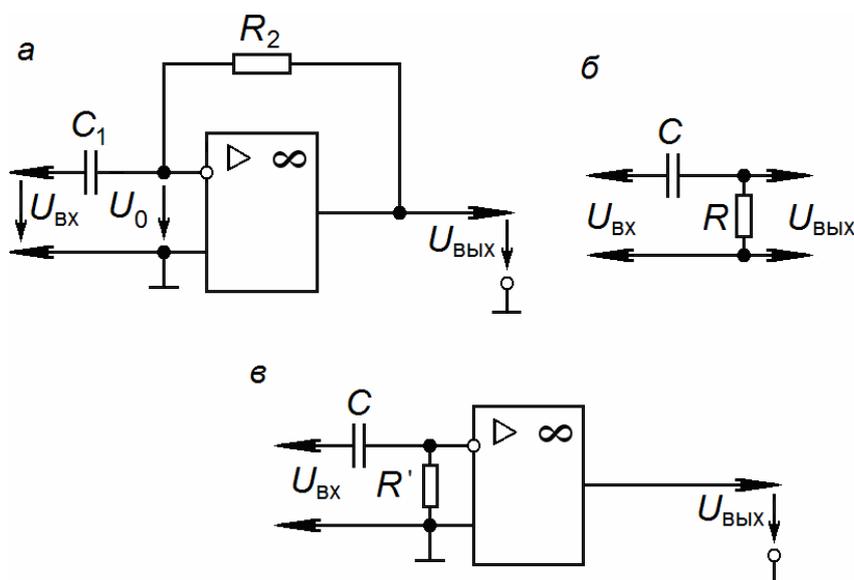


Рис. 12.2. Дифференцирующий усилитель (а), дифференцирующая цепь RC (б), эквивалентная схема дифференцирующего усилителя (в)

Для идеального дифференцирующего усилителя

$$u_{\text{ВЫХ}} = -\tau \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt},$$

где $\tau = R_2 C_1$ – постоянная времени.

Таким образом, напряжение на выходе дифференцирующего усилителя пропорционально производной по времени от входного напряжения. Операцию дифференцирования может осуществлять цепь RC , состоящая из последовательно включенных резистора и конденсатора (рис. 12.2,б).

Можно показать, что реальный дифференцирующий усилитель, обладающий конечным коэффициентом усиления K_0 , эквивалентен цепи RC с конденсатором C и резистором $R' = R / K_0$, напряжение с которого усиливается в K_0 раз (рис.12.2,в).

Рассмотрим интегрирующий усилитель. Он осуществляет интегрирование входного сигнала по времени. Для этого во входную цепь включается резистор R_1 , а в цепь обратной связи – конденсатор C_2 (рис 12.3,а). Для идеального интегрирующего усилителя

$$u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{ВХ}} dt,$$

где $\tau = R_1 C_2$ – постоянная времени.

Таким образом, напряжение на выходе интегрирующего усилителя пропорционально интегралу по времени от входного напряжения. Операцию интегрирования может осуществлять цепь RC , состоящая из последовательно включенных резистора и конденсатора (рис. 12.3,б).

Можно показать, что реальный интегрирующий усилитель, обладающий конечным коэффициентом усиления K_0 , эквивалентен цепи RC с резистором R и конденсатором с ёмкостью $C' = K_0 \cdot C$, напряжение с которого усиливается в K_0 раз (рис. 12.3, в).

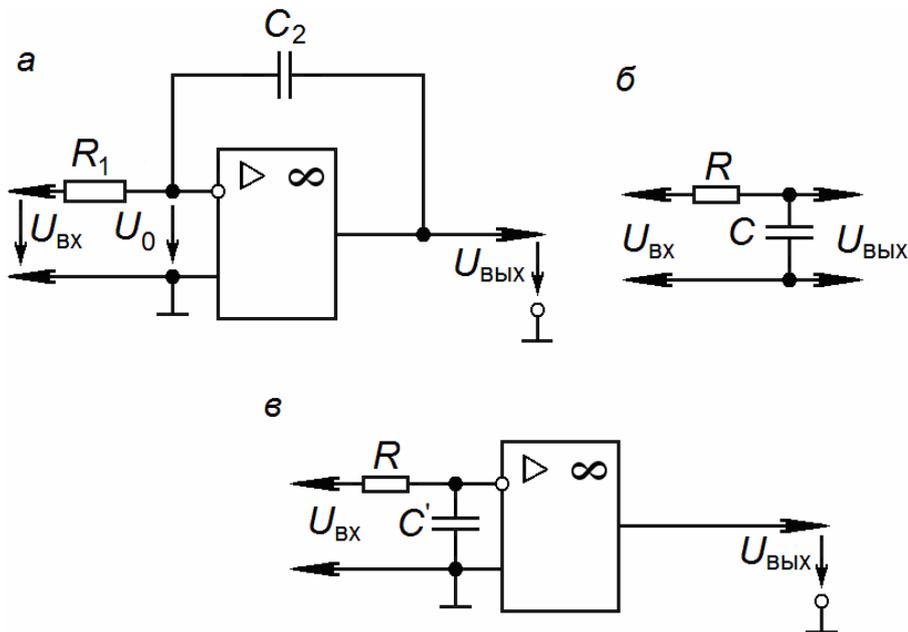


Рис. 12.3. Интегрирующий усилитель (а), интегрирующая цепь RC (б), эквивалентная схема интегрирующего усилителя (в)

На основе операционного усилителя может выполняться избирательный усилитель. Для построения избирательного усилителя в цепь обратной

связи включается специальный фильтр, например, двойной T -образный RC -фильтр (рис.12.4, а), а во входную цепь – резистор R_1 . Параметры фильтра выбираются из условия: $R_{21} = R_{22} = R_{23}$; $C_{21} = C_{22} = C_{23} / 2 = C$. Зависимости коэффициента передачи T -образного RC -фильтра $\beta = U_{oc} / U_{вх}$ и коэффициента усиления $K = U_{вх} / U_{вх}$ избирательного усилителя от частоты входного сигнала приведены на рис. 12.4, б, в.

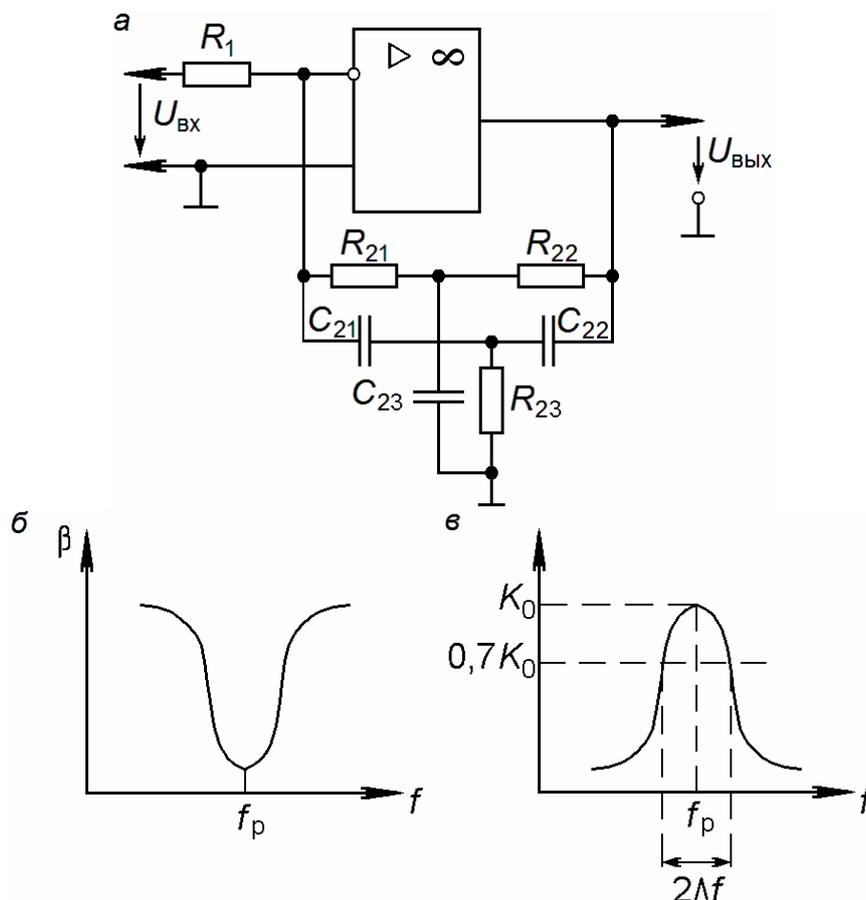


Рис. 12.4. Избирательный усилитель с двойным T -образным RC -фильтром (а), зависимость коэффициента передачи фильтра β (б) и коэффициента усиления избирательного усилителя K (в) от частоты входного напряжения

Резонансная частота и полоса пропускания усилителя рассчитываются по формулам:

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi RC} \sqrt{1 + \frac{2R}{R_{oc.o}}}; \quad 2\Delta f = \frac{1}{\pi C R_{oc.o}}$$

где $R_{oc.o} = K_0 R_1$ – сопротивление фильтра на резонансной частоте;
 K_0 – коэффициент усиления избирательного усилителя на резонансной частоте.

Чем больше коэффициент передачи фильтра β , тем сильнее действует отрицательная обратная связь и меньше коэффициент усиления избирательного усилителя K .

Применяемая аппаратура

В лабораторной работе применяется аппаратура: лабораторный макет ИСУ, генератор сигналов ГЗ, генератор импульсов Г5, электронный вольтметр В7, электронный осциллограф С1, источник питания с напряжением $U = 15 \text{ В}$.

Описание лабораторного макета

Лабораторный макет, передняя панель которого представлена на рис. 12.5, позволяет при различных положениях переключателя «Номер схемы» реализовывать основные схемы включения ИСУ. В положении 1 переключателя «Номер схемы» ИСУ работает в режиме масштабного усилителя (см. рис. 12.5). На вход включается резистор R_1 , а в цепь обратной связи могут быть подключены резисторы R_2 или R'_2 в зависимости от переключателя SA1. Это позволяет изменять коэффициенты усиления схемы.

В положении 2 переключателя реализуется схема суммирующего усилителя (см. рис. 12.5) с двумя входами, куда включены резисторы R_1 и R'_1 . В цепь обратной связи включён резистор R_2 .

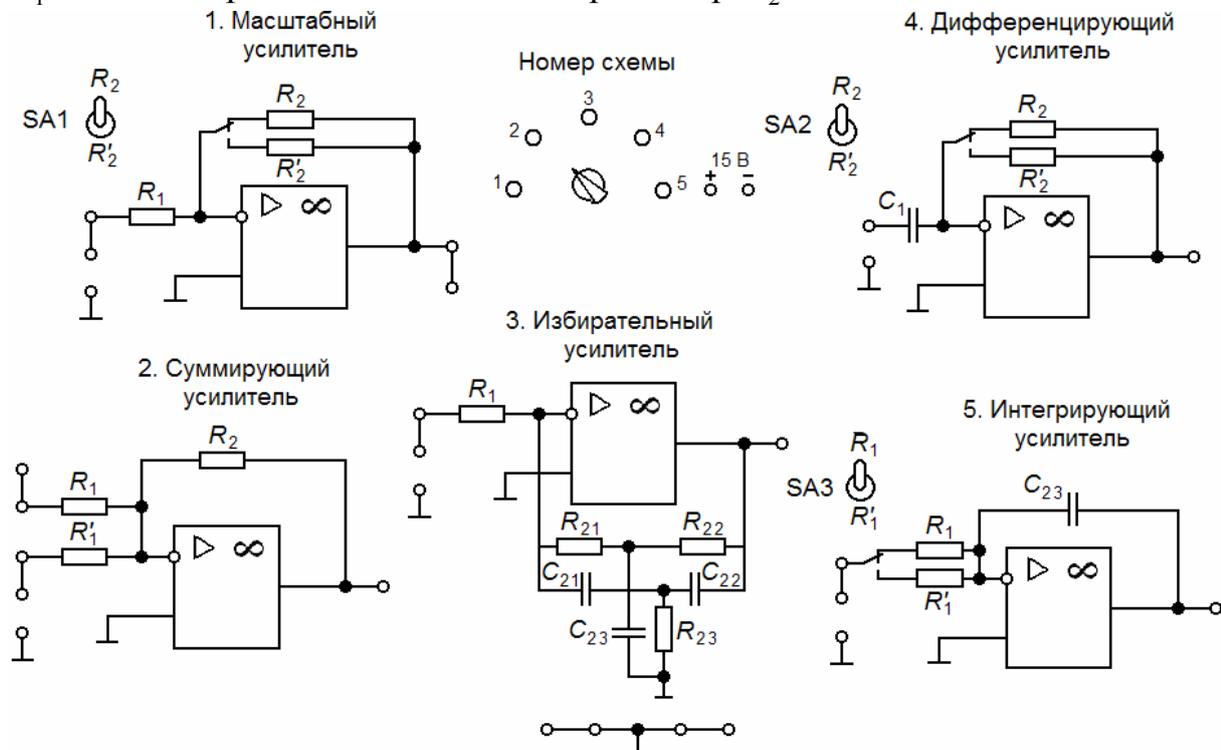


Рис. 12.5. Передняя панель лабораторного макета

В положении 3 переключатель ИСУ работает в режиме избирательного усилителя (см. рис. 12.5). Во входную цепь включается резистор R_1 , а в цепь обратной связи – двойной Т-образный мост с параметрами элементов: $R_{21} = R_{22} = 2R_{23} = R$; $C_{21} = C_{22} = C_{23} / 2 = C$.

В положении 4 переключателя реализуется дифференцирующий усилитель (см. рис. 12.5), на входе которого включён конденсатор C_1 , а в цепь обратной связи включаются резисторы R_2 и R'_2 в зависимости от переключателя $SA2$, что позволяет изменять постоянную времени цепи обратной связи дифференциатора.

В положении 5 переключателя реализуется схема интегрирующего усилителя (см. рис. 12.5). Во входную цепь включаются резисторы R_1 и R'_1 в зависимости от положения переключателя $SA3$, а в цепь обратной связи – конденсатор C_2 . Переключателем $SA3$ меняется постоянная времени цепи обратной связи интегратора.

Макет выполнен на интегральной микросхеме 140УД1А. Элементы, обеспечивающие устойчивый режим работы схемы на рис.4.5, не показаны.

Лабораторное задание

1. Исследовать работу ИСУ в основных схемах включения, перечисленных в предыдущем разделе.
2. Исследовать влияние глубины отрицательной обратной связи на основные характеристики и параметры ИСУ.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторным макетом и измерительными приборами.

2.2. Исследовать работу ИОУ, включённого по схеме масштабного усилителя, для чего:

- поставить переключатель «Номер схемы» на макете в положение 1;
- подключить генератор ГЗ ко входу масштабного усилителя;
- вольтметр В7(В3) подключить к выходу усилителя;
- источник питания подключить к гнездам макета « ± 15 В»;
- после проверки схемы преподавателем установить на выходе источника питания напряжение 15 В;
- установить на выходе генератора ГЗ напряжение 20 мВ;
- снять частотную характеристику масштабного усилителя при двух значениях сопротивления резистора R_2 , устанавливая частоты напряжения

на выходе генератора ГЗ, указанные в табл. 12.1, и измеряя напряжение на выходе усилителя;

- результаты измерений занести в табл. 12.1;

Т а б л и ц а 12.1

$U_{\text{ВЫХ}} = 20 \text{ мВ}; R_1 = 3 \text{ кОм}$														
$R_2 = 9,1 \text{ кОм}$	$f, \text{ кГц}$	0,02	0,2	2	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$													
	K													
$R'_2 = 100 \text{ кОм}$	$U'_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$													
	K'													

– установить на выходе генератора ГЗ частоту сигнала $f=1 \text{ кГц}$ и снять амплитудные характеристики масштабного усилителя при двух значениях сопротивления резистора R_2 ; результаты измерений занести в табл. 12.2;

Т а б л и ц а 12.2

$f=1 \text{ кГц}; R_1 = 3 \text{ кОм}$									
$R_2 = 9,1 \text{ кОм}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$	10	20	30	40	50	75	100	125
	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$								
$R'_2 = 100 \text{ кОм}$	$U'_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$								

– по данным табл. 12.1 рассчитать коэффициенты усиления $K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$, $K' = U'_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$ и построить частотные характеристики масштабного усилителя: $K = \varphi(f)$, $K' = \varphi(f)$ на бланке с полулогарифмическим масштабом (см. рис. 11.6 в описании лабораторной работы №11);

– для частоты сигнала $f=2 \text{ кГц}$ коэффициенты усиления K , K' сравнить с расчётными коэффициентами усиления, определяемыми по формулам: $K = R_2 / R_1$, $K' = R'_2 / R_1$;

– по данным табл. 12.2 построить амплитудные характеристики масштабного усилителя: $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, $U'_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$;

- по результатам экспериментов сделать выводы.

2.3. Исследовать работу ИОУ, включённого по схеме суммирующего усилителя, для чего:

- переключатель «Номер схемы» поставить в положение 2;

– подать с соответствующего выхода генератора ГЗ напряжение $U_{\text{ВХ1}} = 5 \text{ мВ}$ на первый вход суммирующего усилителя и измерить выходное напряжение, подключив вольтметр В7 (В3) к выходу суммирующего усилителя;

- после измерения $U_{\text{ВЫХ}}$ первый вход суммирующего усилителя отключить от генератора ГЗ;
- подать с другого выхода генератора ГЗ напряжение $U_{\text{ВХ2}} = 50$ мВ на второй вход суммирующего усилителя и измерить вольтметром В7(В3) выходное напряжение;
- подать с соответствующих выходов генератора ГЗ сразу два напряжения: $U_{\text{ВХ1}} = 5$ мВ на первый и $U_{\text{ВХ2}} = 50$ мВ на второй входы суммирующего усилителя и измерить вольтметром В7 (В3) выходное напряжение;
- результаты измерений занести в табл. 12.3.

Т а б л и ц а 12.3

$f = 1 \text{ кГц}; R_1 = R'_1 = 3 \text{ кОм}; R_2 = 100 \text{ кОм}$					
$U_{\text{ВХ1}} = 5 \text{ мВ}$		$U_{\text{ВХ2}} = 50 \text{ мВ}$		$U_{\text{ВХ1}} = 5 \text{ мВ}; U_{\text{ВХ2}} = 50 \text{ мВ}$	
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$		$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$		$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$	
Эксп.	Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.	Расчет

- по известным входным напряжениям рассчитать напряжения на выходе усилителя;
- по результатам экспериментов сделать выводы.

2.4. Исследовать работу ИОУ, включённого по схеме избирательного усилителя, для чего:

- переключатель «Номер схемы» поставить в положение 3;
- с генератора ГЗ подать на вход усилителя напряжение $U_{\text{ВХ}} = 10$ мВ;
- изменяя частоту генератора ГЗ в соответствии с табл. 12.4 и измеряя вольтметром В7 (В3) выходное напряжение, снять частотную характеристику избирательного усилителя; результаты измерений занести в табл. 12.4.

Т а б л и ц а 12.4

$R_1 = 3 \text{ кОм}; R_{21} = R_{22} = 2R_{23} = R = 100 \text{ кОм}; C_{21} = C_{22} = C_{23} / 2 = C = 1800 \text{ пФ}$																	
$f, \text{ Гц}$	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$																	
K																	

- по данным табл. 12.4 рассчитать коэффициенты усиления $K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$, и построить частотную характеристику $K = \varphi(f)$;

– по частотной характеристике определить резонансную частоту, коэффициент усиления на резонансной частоте K_0 и на уровне $0,7K_0$ полосу пропускания $2\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$;

– рассчитать резонансную частоту и полосу пропускания усилителя по формулам:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \sqrt{1 + \frac{2R}{R_{\text{oc.o}}}}; \quad 2\Delta f = \frac{1}{\pi CR_{\text{oc.o}}}; \quad R_{\text{oc.o}} = K_0 R_1;$$

– по результатам эксперимента и расчёта сделать выводы.

2.5. Исследовать работу ИОУ включенного по схеме дифференцирующего усилителя, для чего:

– переключатель «Номер схемы» поставить в положение 4;

– с выхода генератора Г5 подать на вход дифференцирующего усилителя последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $U_m = 0,2 \text{ В}$, длительностью $t_u = 0,5 \text{ мс}$ и периодом повторения $T = 1 \text{ мс}$;

– с помощью осциллографа наблюдать сигналы на выходе дифференциатора и измерить их параметры: t_u , U_m при двух значениях постоянной времени цепи обратной связи: $\tau_1 = R_2 C_1$, $\tau_2 = R'_2 C_1$ (длительность выходного импульса измерять на уровне $0,5U_m$);

– осциллограммы выходного напряжения и результаты измерений занести в табл. 12.5;

– по результатам эксперимента сделать выводы.

Т а б л и ц а 1 2 . 5

$U_{\text{ВЫХ}}$	Параметры цепи обратной связи	Осциллограммы $U_{\text{ВЫХ}}$	Параметры $U_{\text{ВЫХ}}$	
			$U_m, \text{В}$	$t_u, \text{мкс}$
$U_{\text{ВЫХ1}}$	$C_1 = 620 \text{ пФ};$ $R_2 = 510 \text{ кОм};$ $\tau_1 = R_2 C_1 =$			
$U_{\text{ВЫХ2}}$	$C_1 = 620 \text{ пФ};$ $R'_2 = 1 \text{ МОм};$ $\tau_2 = R'_2 C_1 =$			

2.6. Исследовать работу ИОУ, включенного по схеме интегрирующего усилителя, для чего:

– переключатель «Номер схемы» поставить в положение 5;

- с выхода генератора Г5 подать на вход дифференцирующего усилителя последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $U_m = 0,2 \text{ В}$, длительностью $t_u = 0,8 \text{ мс}$ и периодом повторения $T=1 \text{ мс}$;
- с помощью осциллографа наблюдать сигналы на выходе интегратора и измерить их параметры: t_u , U_m при двух значениях постоянной времени цепи обратной связи: $\tau_1 = R_1 C_2$, $\tau_2 = R'_1 C_2$;
- осциллограммы выходного напряжения и результаты измерений занести в табл. 12.6;
- по результатам эксперимента сделать выводы.

Т а б л и ц а 12.6

$U_{\text{ВЫХ}}$	Параметры цепи обратной связи	Осциллограммы $U_{\text{ВЫХ}}$	Параметры $U_{\text{ВЫХ}}$	
			$U_m, \text{В}$	$t_u, \text{мс}$
$U_{\text{ВЫХ1}}$	$C_2 = 2700 \text{ пФ};$ $R_1 = 9,1 \text{ кОм};$ $\tau_1 = R_1 C_2 =$			
$U_{\text{ВЫХ2}}$	$C_2 = 2700 \text{ пФ};$ $R'_1 = 3 \text{ кОм};$ $\tau_2 = R'_1 C_2 =$			

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень используемых в работе приборов.
3. Результаты исследований(таблицы, графики, осциллограммы).
4. Выводы по каждому пункту исследований.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте типовую схему включения операционного усилителя. Объясните назначение элементов схемы. Как определяется коэффициент усиления по напряжению?
2. Нарисуйте схему включения операционного усилителя в режиме масштабного усилителя. Объясните назначение элементов схемы. Как определяется коэффициент усиления по напряжению? Нарисуйте частотную характеристику масштабного усилителя.
3. Нарисуйте схему включения операционного усилителя в режиме суммирующего усилителя. Как определяется выходное напряжение суммирующего усилителя?

4. Нарисуйте схему включения операционного усилителя в режиме избирательного усилителя. Объясните частотную характеристику избирательного усилителя.

5. Нарисуйте схему включения операционного усилителя в режиме дифференцирующего усилителя. Как определяется выходное напряжение дифференцирующего усилителя?

6. Нарисуйте схему включения операционного усилителя в режиме интегрирующего усилителя. Как определяется выходное напряжение интегрирующего усилителя?

Лабораторная работа №13

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследовать физические процессы в однополупериодной и мостовой схемах выпрямителя и в схеме параметрического стабилизатора напряжения постоянного тока и оценить влияние параметров их элементов на качество работы.

Лабораторное задание

1. Исследовать физические процессы в однополупериодной и мостовой схемах выпрямителя и влияние сопротивлений нагрузки и емкости конденсатора фильтра на среднее значение выпрямленного напряжения и пульсаций.
2. Исследовать работу схемы параметрического стабилизатора напряжения постоянного тока.

1. Общие теоретические сведения

Преобразование переменного тока (напряжения) в постоянный ток (напряжение) осуществляется с помощью выпрямителей, использующих вентильные свойства электронных приборов. Основные элементы выпрямителя: 1) трансформатор, изменяющий напряжение сети; 2) вентильная группа (обычно полупроводниковые диоды), преобразующая переменный ток в постоянный; 3) сглаживающий фильтр, необходимый для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Рассмотрим основные параметры выпрямителя. Выпрямленное напряжение u_0 (или ток i_0) является пульсирующим, т.е. представляет собой периодическую несинусоидальную функцию времени, которую можно разложить в ряд Фурье. Ряд Фурье содержит постоянную составляющую U_0 (среднее значение выпрямленного напряжения или тока I_0) и переменные составляющие – пульсации, т.е. гармонические составляющие с частотами $k\omega$, где ω – частота сети, $k=1,2,3\dots$. Для характеристики степени сглаживания выпрямленного напряжения вводят параметр $K_{\text{п}}$, называемый коэффициентом пульсаций. Это есть отношение амплитуды максимальной переменной составляющей (гармонической составляющей) выпрямленного напряжения к его среднему значению (постоянной составляющей). Чем меньше $K_{\text{п}}$, тем ближе форма кривой выпрямленного напряжения к прямой линии. К другим параметрам выпрямителя относятся действующие значения токов и напряжений первичной и вторичной обмоток трансфор-

матора, максимальное обратное напряжение на вентиле $U_{\text{обр.маx}}$, максимальный ток вентиля $I_{\text{в.маx}}$ и пр.

Однополупериодная схема выпрямителя. Простейшей выпрямительной схемой является однополупериодная схема (рис.13.1,а). Она содержит трансформатор, в цепь вторичной обмотки которого включены последовательно вентиль и сопротивление нагрузки.

Допустим, что вентиль (обычно полупроводниковый диод) идеальный. Тогда при положительной полуволне напряжения u_2 в нагрузке будет протекать ток, мгновенное значение которого определяется формулой $i_0 = u_2 / R_{\text{н}}$. При отрицательной полуволне напряжения u_2 ток в нагрузке будет равен нулю.

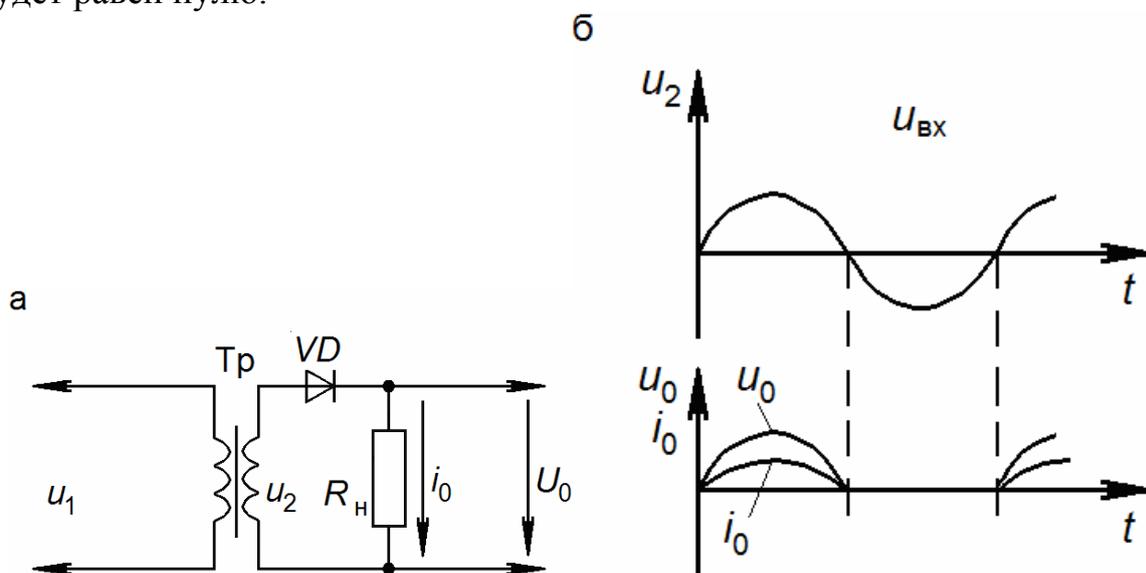


Рис 13.1. Схема(а) и временные графики напряжений и тока (б) однополупериодного выпрямителя

Схема обладает выпрямляющими свойствами. Форма кривой тока i_0 показана на рис.13.1,б. Когда вентиль проводит ток, к нагрузке прикладывается напряжение, представляющее собой положительные полуволны напряжения $u_2 = i_0 R_{\text{н}}$ (рис.13.1,б). Среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке (постоянное напряжение)

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2.$$

Среднее значение (постоянную составляющую) выпрямленного тока можно найти по формуле $I_0 = \frac{U_0}{R_{\text{н}}}$. Максимальный ток вентиля $I_{\text{в.маx}} = \pi I_0$, максимальное обратное напряжение на вентиле $U_{\text{обр.маx}} = \pi U_0$ и коэффициент пульсаций $K_{\text{п}} = 1,57$.

Большой коэффициент пульсаций является существенным недостатком однополупериодной схемы. К недостаткам этой схемы следует отнести также большое обратное максимальное напряжение на вентиле и большой максимальный ток вентилей. Схема используется редко.

Мостовая схема выпрямителя. Мостовая схема выпрямителя содержит трансформатор и четыре вентиля, собранные по схеме моста. Питающее напряжение вторичной обмотки трансформатора включено в одну из диагоналей моста, а в другую диагональ включено сопротивление нагрузки (рис.13.2,а).

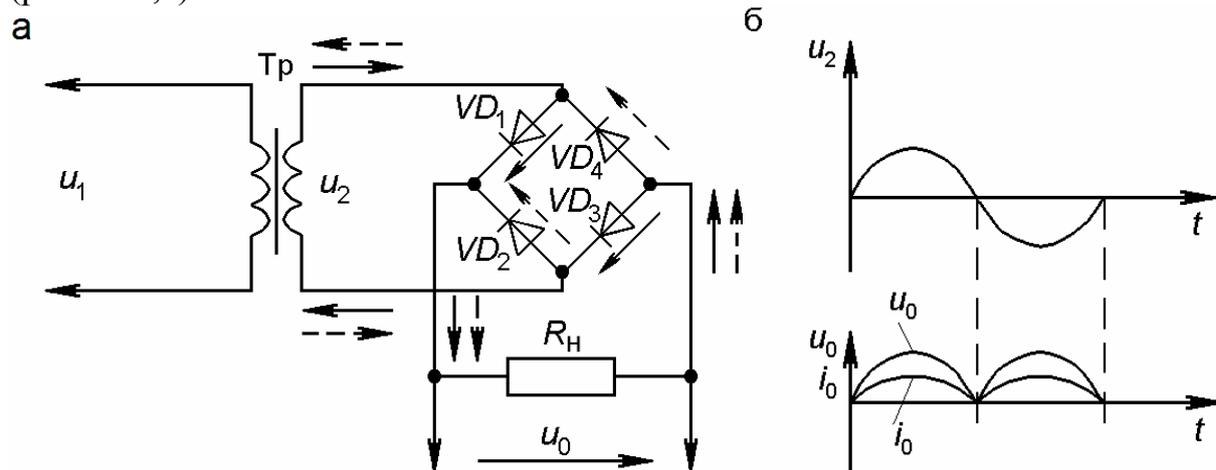


Рис. 13.2. Схема(а) и временные графики напряжений и тока (б) мостового выпрямителя

Форма кривой напряжения вторичной обмотки трансформатора показана на рис.13.2,б. При положительной полуволне напряжения u_2 ток протекает через вентиль VD_1 , сопротивление нагрузки R_n и вентиль VD_3 в направлении, показанном сплошными стрелками. Вентили VD_2 и VD_4 в этот момент тока не пропускают и находятся под обратным напряжением. При отрицательной полуволне напряжения u_2 ток протекает через вентиль VD_2 , сопротивление нагрузки R_n и вентиль VD_4 в направлении, показанном пунктирными стрелками. Вентили VD_1 и VD_4 в это время тока не пропускают. Направления токов, текущих через нагрузку R_n в течение обоих полупериодов напряжения u_2 , совпадают. Форма кривой тока в нагрузке показана на рис.5.2,б. Здесь же дана форма кривой напряжения на нагрузке u_0 , представляющая собой полуволны напряжения u_2 . Происходит двухполупериодное выпрямление.

Среднее значение выпрямленного напряжения составит:

$$U_0 = \frac{U_2 2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9U_2.$$

Постоянная составляющая тока в нагрузке равна сумме средних токов вентилях, т.е. $I_0 = 2I_{\text{во}} = U_0 / R_{\text{н}}$. Максимальный ток вентиля $I_{\text{в.макс}} = \frac{\pi}{2} I_0$, максимальное обратное напряжение на вентиле $U_{\text{обр.макс}} = \frac{\pi}{2} U_0$, коэффициент пульсаций $K_{\text{п}} = 0,67$.

Мостовая схема выпрямителя имеет следующие основные преимущества перед ранее рассмотренной схемой: малый коэффициент пульсаций, вдвое меньшие параметры $U_{\text{обр.макс}}$ и $I_{\text{в.макс}}$. Недостаток схемы – наличие четырех вентилях.

Сглаживающий фильтр. Сглаживающий фильтр служит для уменьшения пульсаций напряжения на нагрузке. Простейшим сглаживающим фильтром является емкостной фильтр. Емкостной фильтр (конденсатор $C_{\text{ф}}$) включается параллельно нагрузке $R_{\text{н}}$ и шунтирует ее для переменных составляющих выпрямленного тока (напряжения).

Рассмотрим работу однополупериодной и мостовой схем выпрямителя с емкостным фильтром. В однополупериодной схеме конденсатор $C_{\text{ф}}$ заряжается через вентиль в моменты времени, когда напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора положительно для вентиля и превышает напряжение u_c на конденсаторе (рис.13.3,а). Этому режиму соответствует интервал времени $t_1 - t_2$. В течение времени $t_2 - t_3$ вентиль закрыт, а конденсатор медленно разряжается через нагрузку с постоянной времени $\tau = C_{\text{ф}} R_{\text{н}}$. При этом напряжение $u_c = u_0$ снижается до некоторого значения. Начиная с момента времени t_3 напряжение u_c становится меньше, чем положительное напряжение u_2 . Вентиль открывается, конденсатор $C_{\text{ф}}$ начинает заряжаться, и процессы повторяются. Как показывает временной график (рис.13.3,а), при включении емкостного фильтра напряжение $u_c = u_0$ не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения u_0 . Чем больше $\tau = C_{\text{ф}} R_{\text{н}}$, тем медленнее разряжается конденсатор $C_{\text{ф}}$, меньше пульсации и больше напряжений U_0 .

В мостовой схеме выпрямителя с емкостным фильтром происходят аналогичные процессы. Только конденсатор $C_{\text{ф}}$ подзаряжается в два раза чаще (рис. 13.3,б), и выпрямленное напряжение $u_0 = u_c$ ближе по форме к постоянному.

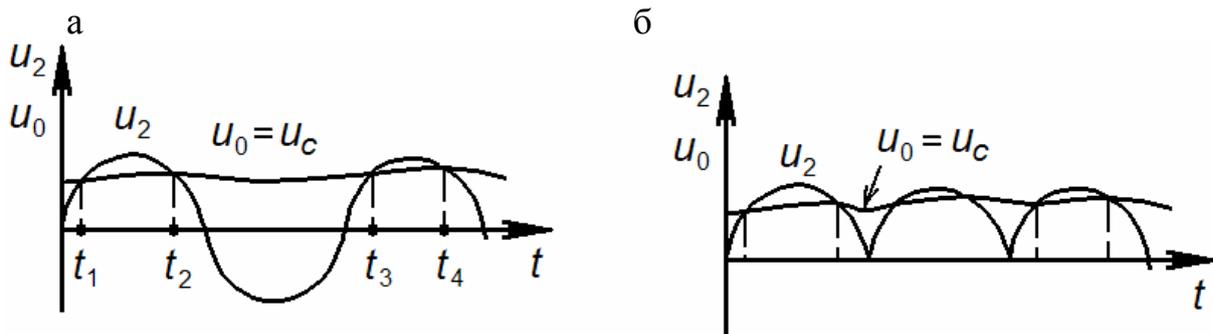


Рис. 13.3. Временные графики напряжений для однополупериодной (а) и мостовой (б) схем выпрямителя с емкостным фильтром

Для стабильной работы электронных устройств необходимо, чтобы постоянное напряжение питания было практически неизменным. Это возможно обеспечить за счёт включения между выпрямителем и нагрузкой стабилизатора напряжения. Стабилизаторы напряжения постоянного тока характеризуются коэффициентом стабилизации по напряжению

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} : \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}},$$

который показывает, во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе меньше, чем на входе.

В лабораторной работе исследуется параметрический стабилизатор напряжения (рис. 13.4). В схеме полупроводниковой стабилитрон включён параллельно нагрузке.

Такие стабилизаторы характеризуются сравнительно небольшим коэффициентом $K_{\text{ст}}$, большим выходным сопротивлением и низким КПД.

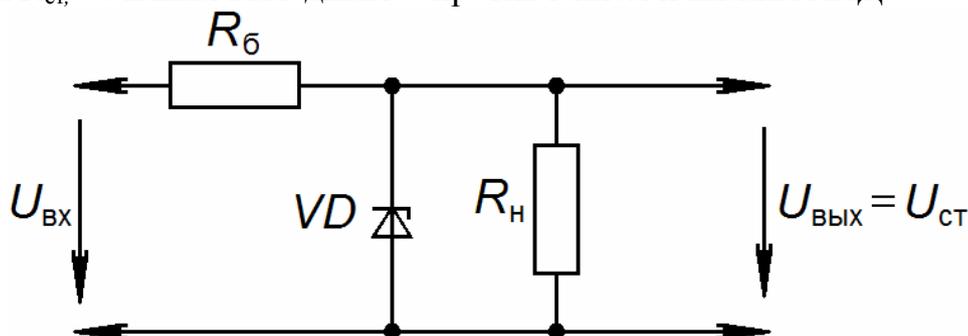


Рис. 13.4. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Принцип работы данного стабилизатора основан на использовании нелинейности обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона.

Применяемая аппаратура

1. Лабораторный макет выпрямителя и стабилизатора.

2. Генератор сигналов ГЗ.
3. Осциллограф универсальный С1.
4. Вольтметр универсальный В7.

Описание лабораторного макета

Лабораторный макет, принципиальная схема которого приведена на рис.13.5, позволяет исследовать однополупериодную и мостовую схемы выпрямителей и схему параметрического стабилизатора постоянного напряжения. Переход от одной схемы выпрямителя к другой осуществляется переключателем $SA1$, а подключение стабилизатора к выходу выпрямителя – переключателем $SA4$.

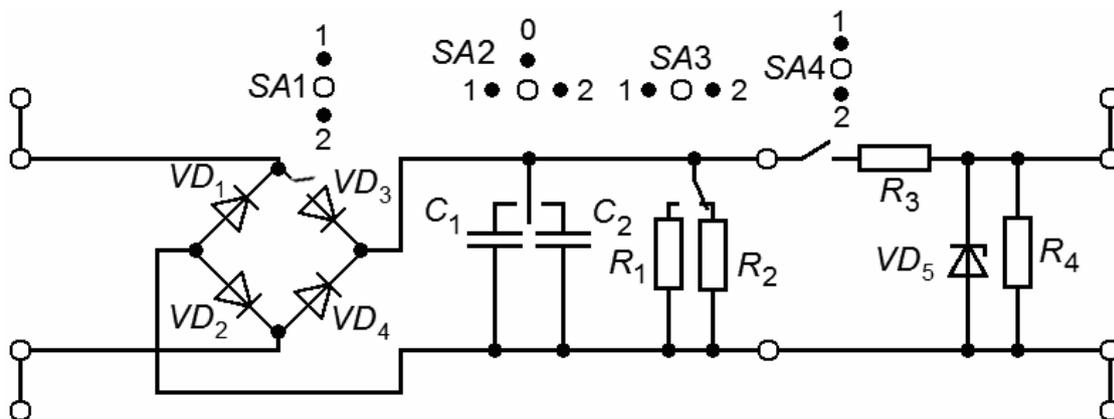


Рис. 13.5. Принципиальная электрическая схема лабораторного макета

Выпрямитель собран на диодах $VD1-VD4$ типа Д7Ж и может работать на чисто активную нагрузку (переключатель $SA2$ в среднем положении) или активную нагрузку с емкостным фильтром. Величина ёмкости фильтра C_1 или C_2 меняется с помощью переключателя $SA2$, а сопротивление нагрузки R_1 или R_2 – переключателем $SA3$. Параметрический стабилизатор собран на стабилитроне КС147 с балластным резистором R_3 и работает на активную нагрузку.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторным оборудованием и измерительными приборами.

2.2. Исследовать работу схемы однополупериодного выпрямителя с чисто активной нагрузкой и емкостным фильтром, для чего:

- переключатели $SA1$, $SA3$, $SA4$ поставить в положение 1, а переключатель $SA2$ – в среднее положение 0;
- к входу выпрямителя подключить генератор ГЗ и осциллограф С1;
- к выходу выпрямителя подключить вольтметр В7;

- после проверки схемы преподавателем подать на вход выпрямителя напряжение $U=5$ В (или 15 В в зависимости от типа генератора ГЗ) с частотой $f=50$ Гц;
- зарисовать осциллограмму входного напряжения ;
- переключить осциллограф на выход выпрямителя, зарисовать осциллограмму выходного напряжения;
- измерить величину пульсаций напряжения ΔU_n с помощью осциллографа и величину постоянной составляющей напряжения U_0 с помощью вольтметра ; результаты измерений занести в табл. 5.1;
- подключить параллельно нагрузке с сопротивлением R_1 , а затем с сопротивлением R_2 (переключатель SA3 – в положениях 1 и 2) сначала емкостный фильтр с ёмкостью C_1 , а затем с ёмкостью C_2 (переключатель SA2 – в положениях 1 и 2), зарисовать осциллограммы напряжений и произвести указанные выше измерения; результаты измерений занести в табл. 13.1.
- повторить все измерения на частотах входного напряжения $f=100$ Гц и $f=400$ Гц; результаты измерений занести в табл. 13.1.

Таблица 13. 1

	Тип схемы		Однополупериодная			Мостовая		
	Частота напряжения		50 Гц	100 Гц	400 Гц	50 Гц	100 Гц	400 Гц
C=0	$R_1 = 820$ Ом	$U_0, В$						
		$\Delta U_n, В$						
C=10 мкФ	$R_1 = 820$ Ом	$U_0, В$						
		$\Delta U_n, В$						
	$R_2 = 2,4$ кОм	$U_0, В$						
		$\Delta U_n, В$						
C=20 мкФ	$R_1 = 820$ Ом	$U_0, В$						
		$\Delta U_n, В$						
	$R_2 = 2,4$ кОм	$U_0, В$						
		$\Delta U_n, В$						

2.3. Исследовать работу мостовой схемы выпрямителя (переключатель SA1 поставить в положение 2) в порядке, указанном в п. 2.2; результаты измерений занести в табл. 13.1.

2.4. Построить графики зависимостей величин пульсаций и постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_0 от постоянной времени нагрузки $\tau=RC$ для трех значений частоты входного напряжения $f=50$ Гц,

100 Гц, 400 Гц. Сделать выводы по результатам исследований схем выпрямителей.

2.5. Исследовать работу схемы параметрического стабилизатора напряжения, для чего:

- переключатели $SA1$, $SA2$, $SA3$ и $SA4$ поставить в положение 2;
- вольтметр подключить к входу стабилизатора;
- генератор ГЗ подключить к входу выпрямителя;
- изменяя выходное напряжение генератора, изменять на входе стабилизатора напряжение $U_{ст.вх} = 5...19$ В через 2 вольта и измерять напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст.вых}$ с помощью вольтметра; данные измерений занести в табл. 13.2.

Т а б л и ц а 13.2

$f = 400$ Гц								
$U_{ст.вх}$, В	5	7	9	11	13	15	17	19
$U_{ст.вых}$, В								

2.6. Построить график зависимости $U_{ст.вых} = \varphi(U_{ст.вх})$. По результатам исследований сделать выводы.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень используемых в работе приборов.
3. Схема макета.
4. Результаты исследований (таблицы, графики, осциллограммы).
5. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Как работает однополупериодная схема выпрямителя без сглаживающего фильтра?
2. Как работает однополупериодная схема выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром?
3. Как работает мостовая схема выпрямителя без сглаживающего фильтра?
4. Как работает мостовая схема выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром?
5. Сравните по свойствам однополупериодную и мостовую схемы выпрямителя.

Лабораторная работа №14

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Цель работы: изучить физические процессы в схемах формирования импульсов: дифференцирующей и интегрирующей цепях RC , последовательной и параллельной схемах диодных амплитудных ограничителей.

Лабораторное задание

1. Исследовать работу дифференцирующей и интегрирующей цепей RC .
2. Исследовать работу последовательного и параллельного диодных амплитудных ограничителей.
3. Сделать выводы по лабораторной работе.

В выводах:

- объяснить осциллограммы напряжений на входе и выходе схем формирования импульсов;
- произвести анализ влияния постоянной времени на выходное напряжение дифференцирующей и интегрирующей цепей RC ;
- сделать анализ влияния полярности включения диода на работу диодных амплитудных ограничителей;
- сделать сравнительный анализ работы параллельного амплитудного ограничителя на универсальном диоде и стабилитроне.

1. Общие теоретические сведения

Для формирования электрических импульсов применяются линейные и нелинейные электрические цепи. К линейным электрическим цепям, используемым для формирования импульсов, относятся дифференцирующая и интегрирующая цепи RC .

Примером нелинейных электрических цепей, используемых для формирования импульсов, являются различные виды диодных амплитудных ограничителей.

Дифференцирующая цепь RC . Дифференцирующей называют цепь, напряжение на выходе которой пропорционально производной по времени от входного напряжения. Такие цепи используются для получения коротких остrokонечных импульсов. Дифференцирующая цепь RC приведена на рис.14.1,а.

Пусть на вход цепи поступает прямоугольный импульс с амплитудой U_m , длительность которого $t_u \gg \tau$, где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи. Поскольку конденсатор не может мгновенно изменить запас своей энергии, за время действия переднего фронта входного импульса напряжение на

нём останется равным нулю. Следовательно, всё приложенное к цепи напряжение выделится на резисторе R (см. рис. 14.1, б), т.е. на выходе.

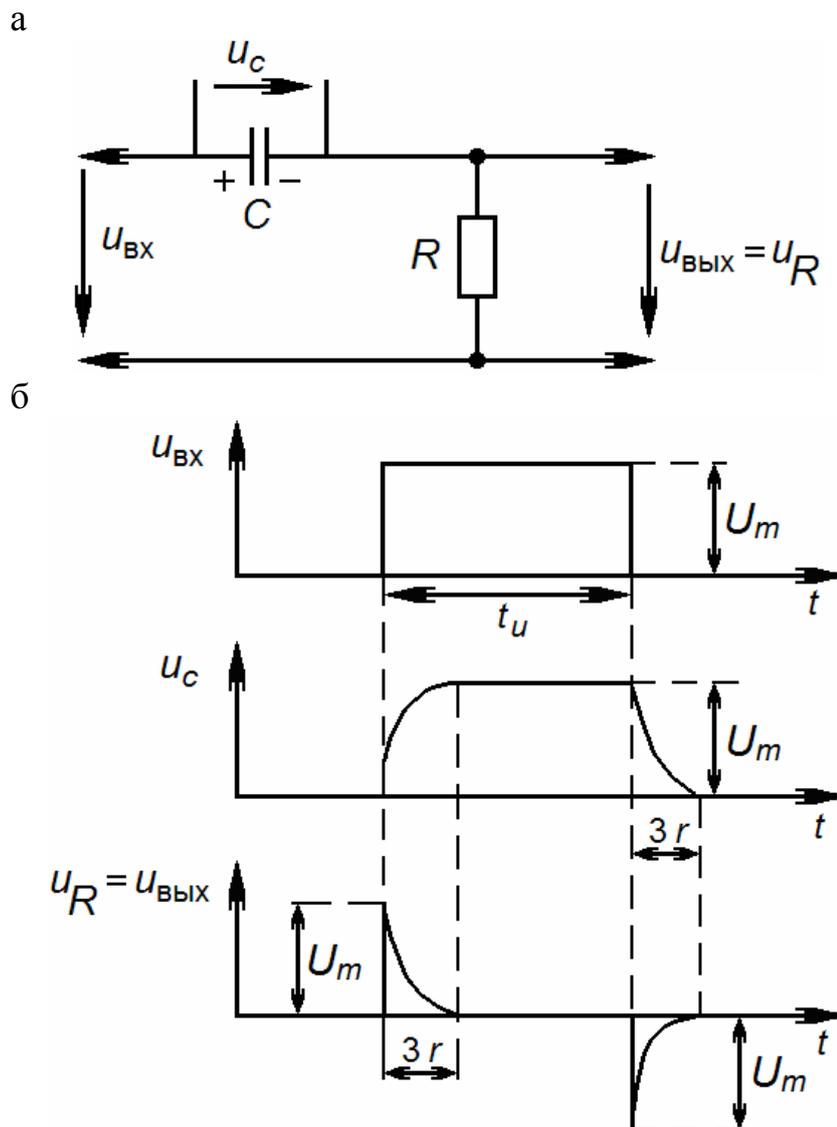


Рис. 14.1. Дифференцирующая цепь RC :
а – схема; б – временные графики напряжений на элементах схемы

За время действия входного импульса конденсатор заряжается, напряжение на нём u_c возрастает, а напряжение на выходе цепи $u_{\text{вых}} = u_R = u_{\text{вх}} - u_c$ убывает по экспоненциальному закону. Так как $t_u \gg \tau$, то конденсатор успеет полностью зарядиться (за время 3τ) и напряжение u_c будет равно напряжению $u_{\text{вх}}$ еще до окончания входного импульса. При этом напряжение на резисторе $u_R = u_{\text{вых}} = 0$ (рис. 14.1, б).

По окончании входного импульса, когда напряжение $u_{\text{вх}}$ становится равным нулю, заряженный конденсатор подключается к резистору R (через

сопротивление источника входного импульса) и начинает разряжаться через него. При этом $u_{\text{ВЫХ}}$ изменяется по экспоненциальному закону от $-U_m$ до нуля за время 3τ (рис.14.1,б).

Напряжение на выходе имеет вид остроконечных импульсов разной полярности. Чем меньше постоянная времени цепи τ , тем быстрее заряжается и разряжается конденсатор и тем меньшую длительность имеют выходные импульсы.

Интегрирующая цепь RC.

Интегрирующей называют цепь, напряжение на выходе которой пропорционально интегралу по времени от входного напряжения. В используемой для интегрирования цепи RC выходные напряжения снимаются с конденсатора (рис.14.2,а), а постоянная времени цепи $\tau = RC$ выбирается из условия $\tau \gg t_u$, где t_u – длительность входного прямоугольного импульса.

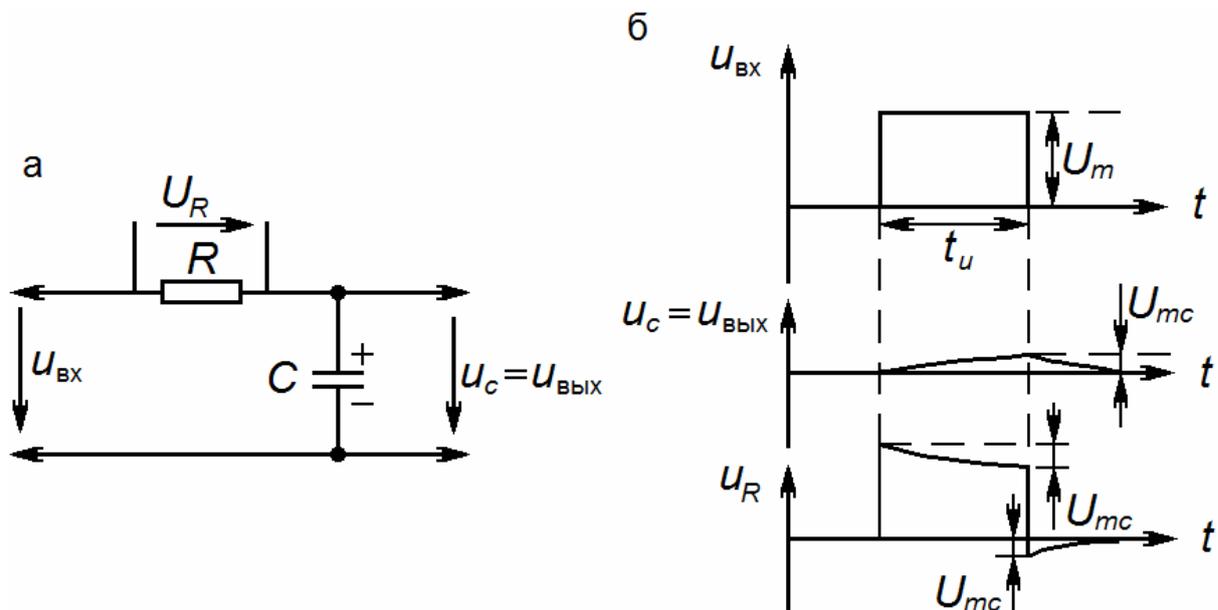


Рис.14.2. Интегрирующая цепь RC:
а – схема; б – временные графики напряжений

При воздействии на вход интегрирующей цепи прямоугольного импульса (рис 14.2,б) начинается медленный экспоненциальный заряд конденсатора C, который продолжается за время действия входного импульса t_u . За время t_u напряжение $u_c = u_{\text{ВЫХ}}$ возрастёт до небольшой величины U_{mc} , а напряжение на резисторе u_R уменьшится на эту величину. В момент окончания входного импульса начинается медленный экспоненциальный разряд конденсатора C. На резисторе напряжение скачком уменьшается, и за счет разряда конденсатора возникает отрицательный скачок напряжения, равный U_{mc} . По мере разряда этот скачок уменьшается (рис 14.2,б). Напряжение на выходе $u_c = u_{\text{ВЫХ}}$ имеет форму пилообразного импульса.

Интегрирующая цепь характеризуется двумя параметрами:

– коэффициентом использования напряжения η , представляющим собой отношение амплитуды пилообразного импульса $U_{mc} = U_{\text{ВЫХ } m}$ к амплитуде импульса на входе интегрирующей цепи $U_{\text{ВХ } m}$, т.е.

$$\eta = \frac{U_{\text{ВЫХ } m}}{U_{\text{ВХ } m}};$$

– коэффициентом нелинейности β , представляющим собой относительное изменение скорости выходного напряжения, т.е.

$$\beta = \frac{\left| \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right|_{\text{нач}} - \left| \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right|_{\text{кон}}}{\left| \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right|_{\text{нач}}}.$$

Чем больше постоянная времени цепи τ , тем медленнее заряжается конденсатор C , меньше амплитуда пилообразного импульса $U_{\text{ВЫХ } m}$, меньше коэффициент η и меньше коэффициент β , т.е. выше линейность пилообразного импульса.

Диодные амплитудные ограничители. В диодных амплитудных ограничителях, как и в любых амплитудных ограничителях, напряжение на выходе пропорционально входному напряжению до тех пор, пока выходное напряжение не достигнет некоторого уровня, называемого порогом ограничения. После этого $u_{\text{ВЫХ}}$ остаётся постоянным, несмотря на изменения входного напряжения.

Диодные ограничители бывают последовательные и параллельные.

Рассмотрим последовательные диодные амплитудные ограничители.

В последовательном диодном ограничителе диод включён последовательно с выходом ограничителя, куда подключён резистор R (рис.14.3, а). Если на вход этой схемы поступает положительная полуволна синусоидального напряжения, то в цепи проходит ток, который создаёт напряжение на прямом сопротивлении диода $R_{\text{пр}}$ и на резисторе R . Так как всегда выбирают сопротивление резистора $R \gg R_{\text{пр}}$, то $u_{\text{ВЫХ}} \approx u_{\text{ВХ}}$. Во время действия отрицательной полуволны диод заперт (обратным током пренебрегаем) и $u_{\text{ВЫХ}} = 0$ (рис.14.3,б). Рассмотренная схема обеспечивает ограничение входного напряжения снизу с порогом ограничения, равным нулю. Ограничение сверху с нулевым порогом можно получить, изменив полярность включения диода (см. рис. 14.3,в,г).

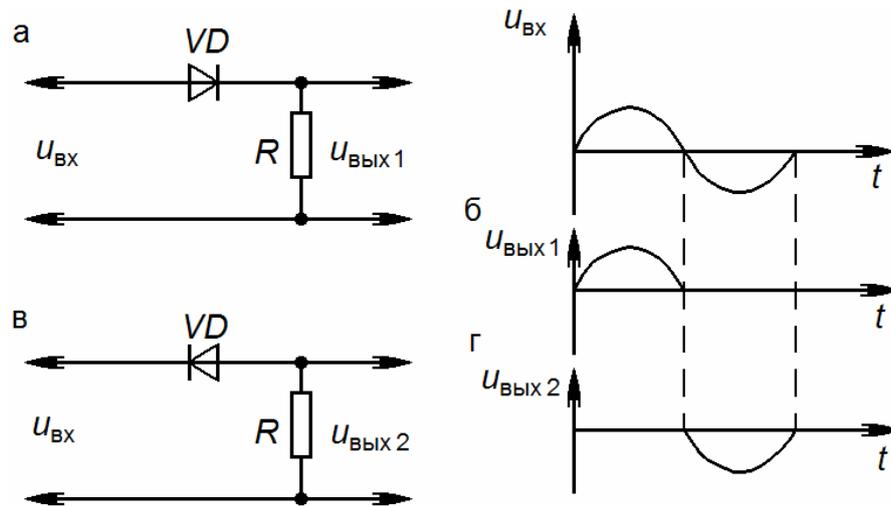


Рис. 14.3 Последовательные диодные амплитудные ограничители с нулевым уровнем ограничения:
а, в – схемы; б, г –временные графики напряжений

Сравнение обеих схем показывает, что характер ограничения (сверху или снизу) зависит от способа (полярности) включения диода. Рассмотрим параллельные диодные амплитудные ограничители.

В схеме параллельного диодного ограничителя диод включается параллельно выходу ограничителя. Последовательно с диодом включается ограничительный резистор R (рис. 14.4,а). Когда на вход этой схемы подаётся положительная полуволна входного напряжения, диод открывается. Так как прямое сопротивление диода $R_{пр}$ мало по сравнению с сопротивлением резистора R , то почти всё входное напряжение выделяется на резисторе и $u_{вых} \approx 0$. Когда действует отрицательная полуволна входного напряжения, диод заперт и на нём выделяется почти всё входное напряжение, т.е. $u_{вх} \approx u_{вых}$ (рис. 14.4,б).

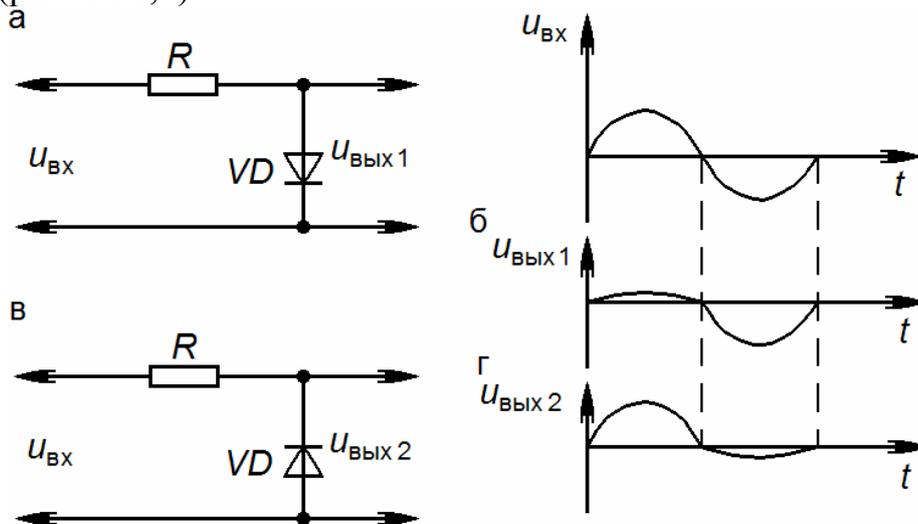


Рис. 14.4. Параллельные диодные амплитудные ограничители с нулевым уровнем ограничения:
а, в – схемы; б, г –временные графики напряжений

Схема является ограничителем сверху на нулевом уровне. Если изменить полярность включения диода, то получим ограничение снизу на нулевом уровне (рис. 14.4,в,г).

Параллельный диодный амплитудный ограничитель на кремниевом стабилитроне (рис. 14,5,а). Из вольтамперной характеристики стабилитрона (рис. 14.5,б) следует, что при обратном напряжении на стабилитроне $U_{обр}=U_{ст}$ обратный ток резко возрастает, а напряжение на стабилитроне $U_{ст}$ остаётся практически постоянным. Это позволяет получить выходное напряжение, ограниченное сверху на уровне ограничения, равном $u_{ст}$.

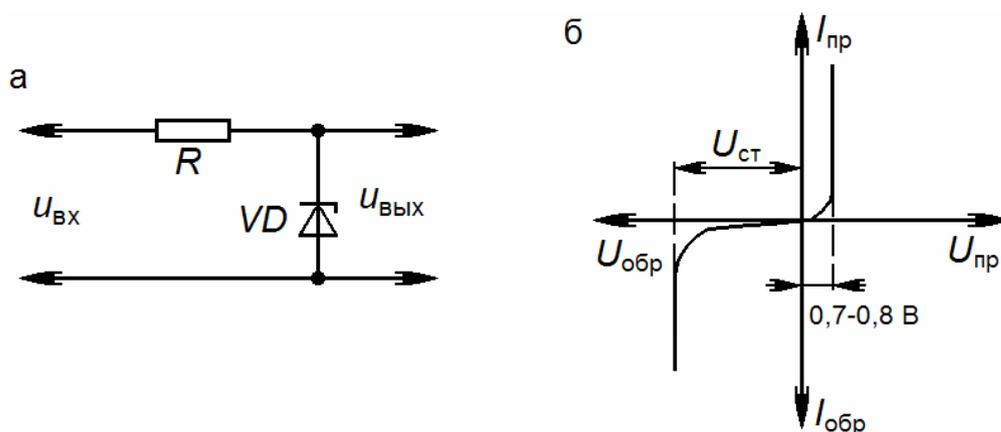


Рис. 14.5. Параллельный диодный амплитудный ограничитель на стабилитроне (а) и вольтамперная характеристика стабилитрона (б)

Прямая ветвь вольтамперной характеристики стабилитрона имеет излом практически для всех типов стабилитронов при напряжении 0,7–0,8 В. Таким образом, параллельный амплитудный ограничитель на стабилитроне (рис. 14.5,а) позволяет получить выходное напряжение, ограниченное сверху на уровне $U_{ст}$ и снизу на уровне 0,7–0,8 В.

В лабораторной работе исследуются дифференцирующая и интегрирующая цепи RC , последовательные и параллельные диодные амплитудные ограничители.

Описание лабораторной установки

Функциональная схема эксперимента приведена на рис. 14.6.

Функциональная схема эксперимента содержит:

- одну из исследуемых схем формирования импульсов;
- внутренний генератор входных прямоугольных импульсов, собранный на интегральной микросхеме;
- источник питания с напряжением $U = 9$ В для питания внутреннего генератора прямоугольных импульсов;

– электронный осциллограф типа С1, позволяющий визуально наблюдать процессы в схемах формирования импульсов, измерять амплитуду и длительность выходного напряжения.

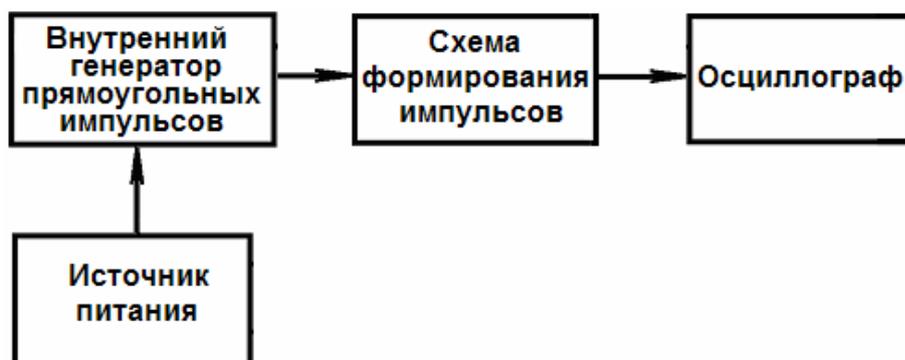


Рис 14.6. Функциональная схема эксперимента

На рис. 14.7 приведены схемы формирования импульсов, которые собраны на лабораторном макете и исследуются в лабораторной работе.

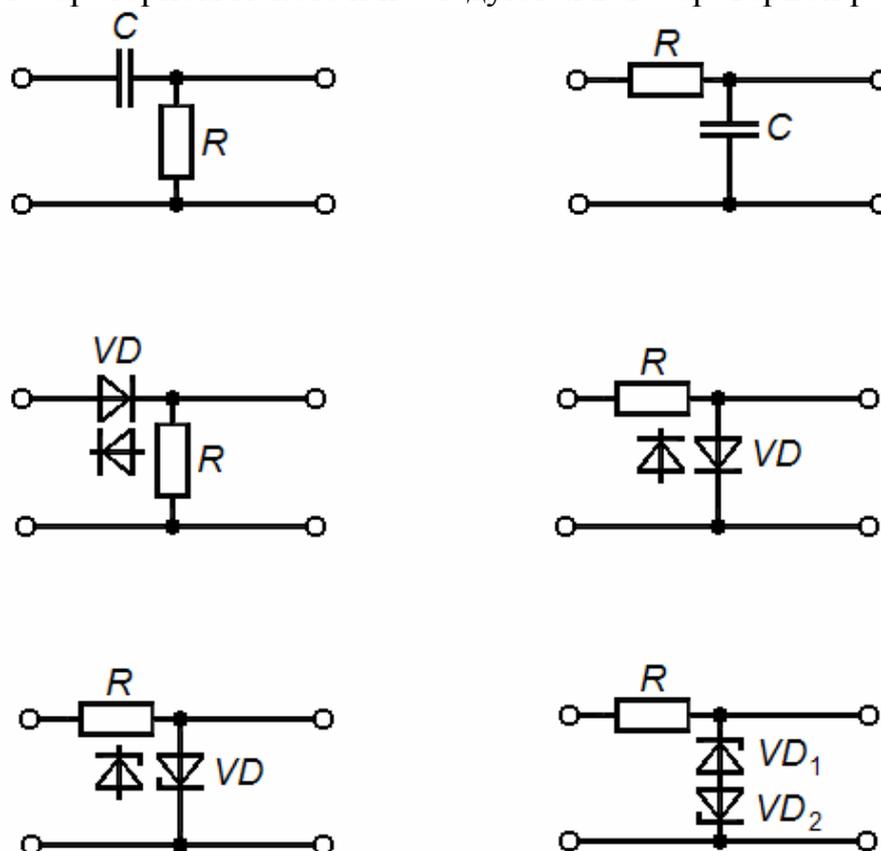


Рис. 14.7. Схемы формирования импульсов, исследуемые в лабораторной работе и собранные на лабораторном макете

С помощью переключателей R и C , расположенных на макете, изменяются значения сопротивления резистора и ёмкости конденсатора цепей

RC , что позволяет исследовать влияние постоянной времени цепи RC на форму выходного напряжения.

Тумблеры, расположенные в левой части макета, позволяют исследовать влияние полярности включения и типа диода на форму выходного напряжения.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторным макетом и измерительными приборами.

2.2. Исследовать дифференцирующую цепь RC с целью выяснения влияния постоянной времени цепи $\tau = RC$ на форму, амплитуду и длительность выходных импульсов, для чего:

- собрать схему эксперимента (см. рис.14.6);
- после проверки схемы преподавателем подать от источника питания постоянное напряжение, равное 9 В, для питания внутреннего генератора прямоугольных импульсов;
- получить на экране осциллографа импульсный сигнал внутреннего генератора;
- зарисовать в отчёте (табл. 14.1) осциллограмму импульсного сигнала внутреннего генератора и определить по осциллографу амплитуду и длительность сигнала; результаты измерений занести в табл. 14.1;

Т а б л и ц а 14.1

Входной сигнал (генератора) и его параметры		
Осциллограмма	Амплитуда, В	Длительность, мкс

– не изменяя положения ручек осциллографа, снять и зарисовать в отчёте (табл. 14.2) осциллограммы выходных импульсов цепи RC для трех левых положений переключателей R и C , расположенных на макете;

– измерить с помощью осциллографа амплитуду и длительность выходных импульсов цепи RC и на каждой осциллограмме указать значения длительности импульсов, мкс, и их амплитуды в вольтах (см. табл. 14.2).

Т а б л и ц а 14.2

Исследование дифференцирующей цепи RC			
Параметры цепи			Результаты измерений
C , нФ	R , кОм	τ , мкс	Осциллограммы выходных импульсов и результаты измерений

2.3. По результатам расчета и измерений можно сделать вывод: при каком соотношении длительности входного импульса и постоянной времени цепи τ следует применять цепь RC для формирования остроконечных импульсов, т.е. в качестве дифференцирующей цепи.

2.4. Исследовать интегрирующую цепь RC с целью выяснения влияния постоянной времени цепи τ на амплитуду и линейность выходного импульса цепи, для чего:

– зарисовать в отчете (табл. 14.3) осциллограммы выходного импульса цепи RC для трёх правых положений переключателей R и C , расположенных на макете;

– измерить с помощью осциллографа амплитуду и длительность выходных импульсов цепи RC и указать эти параметры на осциллограммах.

Т а б л и ц а 14.3

Исследование интегрирующей цепи RC			
Параметры цепи			Результаты измерений
C , нФ	R , кОм	τ , мкс	Осциллограммы выходных импульсов и результаты измерений

2.5. По результатам расчета и измерений сделать вывод о влиянии постоянной времени цепи τ на форму, амплитуду и линейность выходного импульса цепи.

2.6. Исследовать работу последовательного и параллельного диодных амплитудных ограничителей с нулевым уровнем ограничения, для чего:

– переключить осциллограф на вход исследуемой схемы ограничителя;
 – зарисовать в отчете осциллограммы входного и выходных напряжений для схем ограничителей: последовательный ограничитель сверху, последовательный ограничитель снизу, параллельный ограничитель сверху, параллельный ограничитель снизу, параллельный ограничитель на стабилитроне (табл. 14.4).

Т а б л и ц а 14.4

Входной сигнал	Типы ограничителей	Выходные сигналы

2.7. По результатам исследований диодных амплитудных ограничителей сделать выводы:

– о влиянии полярности включения диода на характер ограничения;

- о влиянии места включения диода на качество ограничения;
- о влиянии типа диода на характер ограничения.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Функциональная схема эксперимента.
3. Результаты исследований с соответствующими осциллограммами, числовыми значениями параметров и их объяснение.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Как работает дифференцирующая цепь RC ?
2. Как работает интегрирующая цепь RC ?
3. Какова длительность импульсов, формируемых дифференцирующей цепью RC и почему эти импульсы разной полярности?
4. Как зависят амплитуда и длительность выходного импульса интегрирующей цепи RC от постоянной времени цепи τ ?
5. Как работает последовательный диодный ограничитель с нулевым уровнем ограничения?
6. Как работает параллельный диодный ограничитель с нулевым уровнем ограничения?

Лабораторная работа №15 ИССЛЕДОВАНИЕ D-ТРИГГЕРА

Цель работы: проанализировать и экспериментально подтвердить основные теоретические положения, поясняющие принцип действия D -триггера в основном и счетном режимах работы.

Лабораторное задание

Исследовать D -триггер в основном (задержки) и счетном режимах работы и зависимость параметров выходных импульсов D -триггера от параметров входных импульсов.

1. Общие теоретические сведения

D -триггер – это триггер с одним информационным D -входом и синхронизирующим C -входом. Он передает на свой прямой выход Q сигнал, действующий на входе D , при воздействии синхронизирующего сигнала на C -вход. D -триггер может работать в режиме задержки (основной режим) и в счетном режиме. D -триггер может быть одноступенчатым и двухступенчатым.

Рассмотрим одноступенчатый триггер, работающий в режиме задержки.

Одноступенчатый D -триггер состоит из синхронного одноступенчатого RS -триггера, дополненного элементом НЕ (рис. 15.1).

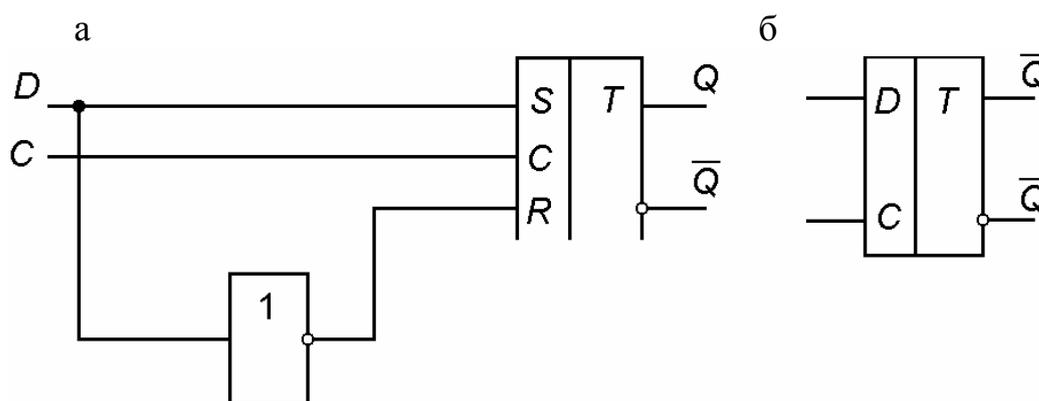


Рис. 15.1. Схема (а) и условное обозначение (б) одноступенчатого D -триггера

Как видно из рис. 15.1, сигнал с D -входа подаётся на S -вход RS -триггера ($S=D$), а на входе R устанавливается противоположный сигнал. Это приводит к тому, что любой сигнал на входе D создаёт на S - и R -входах

RS -триггера комбинацию ($S=1, R=0$ или $S=0, R=1$), способную переключить триггер в состояние $Q=S=D$ при $C=1$. Таким образом, при $C=1$ D -триггер является повторителем: на выходе Q повторяется сигнал входа D . Однако это повторение начинается только с поступлением синхронизирующего импульса на вход C , т.е. с задержкой на время $t_{\text{зад}}$ относительно сменившегося сигнала на D -входе. Временные графики напряжений для D -триггера изображены на рис. 15.2.

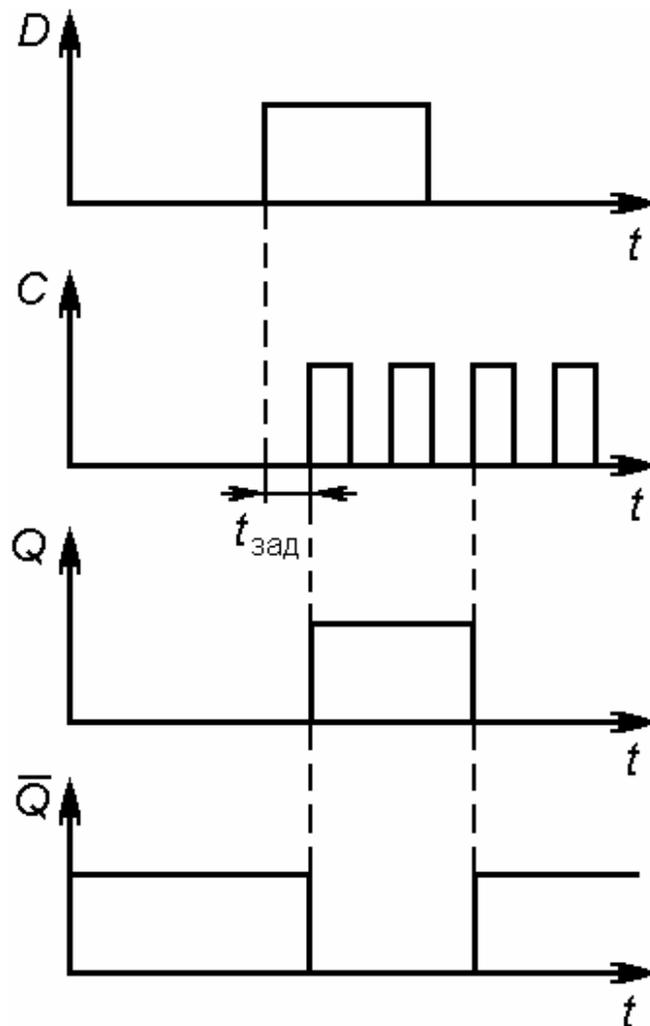


Рис. 15.2. Временные графики напряжений для одноступенчатого D -триггера

Рассмотрим двухступенчатый D -триггер. Его первая ступень представляет собой одноступенчатый D -триггер, а вторая ступень – синхронный одноступенчатый RS -триггер (рис. 15.3). Состояние D -входа передаётся первой ступенью с приходом синхронизирующего импульса, т.е. по его переднему фронту; вторая ступень принимает состояние с окончанием синхронизирующего импульса, т.е. по его срезу (спаду).

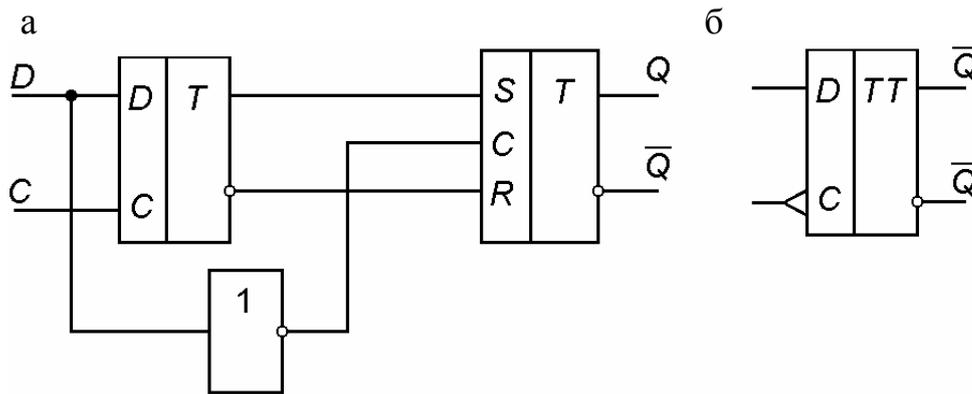


Рис. 15.3. Схема (а), условное обозначение (б) двухступенчатого D -триггера

Если в двухступенчатом D -триггере выход Q соединить со входом D , а на C -вход подавать входные импульсы (рис. 15.4), то нетрудно видеть, D -триггер будет переключаться из одного состояния в другое срезами каждого входного импульса. D -триггер будет работать в счетном режиме. При этом длительность и период выходных импульсов: $t_u = T_{\text{вх}}$, $T = 2T_{\text{вх}}$, где $T_{\text{вх}}$ – период входных импульсов; соответственно частота выходных импульсов $F = F_{\text{вх}}/2$, где $F_{\text{вх}}$ – частота входных импульсов. Для триггера со счетным запуском частота повторения выходных импульсов снижена (поделена) по сравнению с частотой входных в два раза (рис. 15.4).

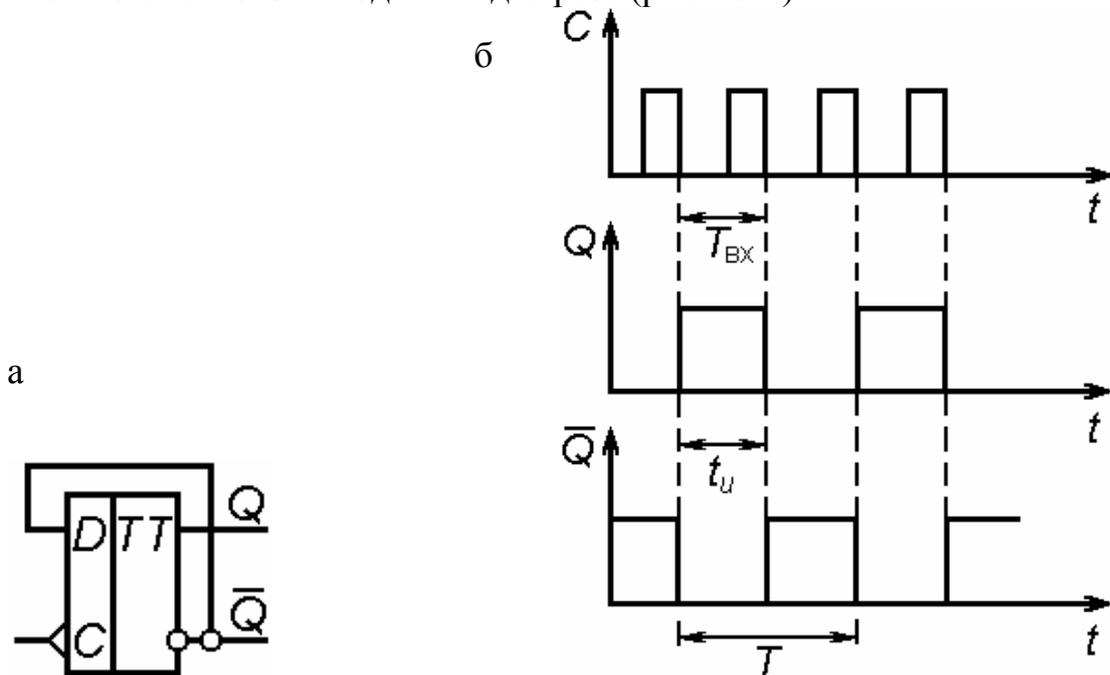


Рис. 15.4. D -триггер в счётном режиме

В ряде устройств необходимо иметь последовательность импульсов, частота которых меньше частоты входных импульсов в n раз. Для этого применяются делители частоты, которые могут быть построены на последовательно включенных счетных триггерах (рис. 15.5).

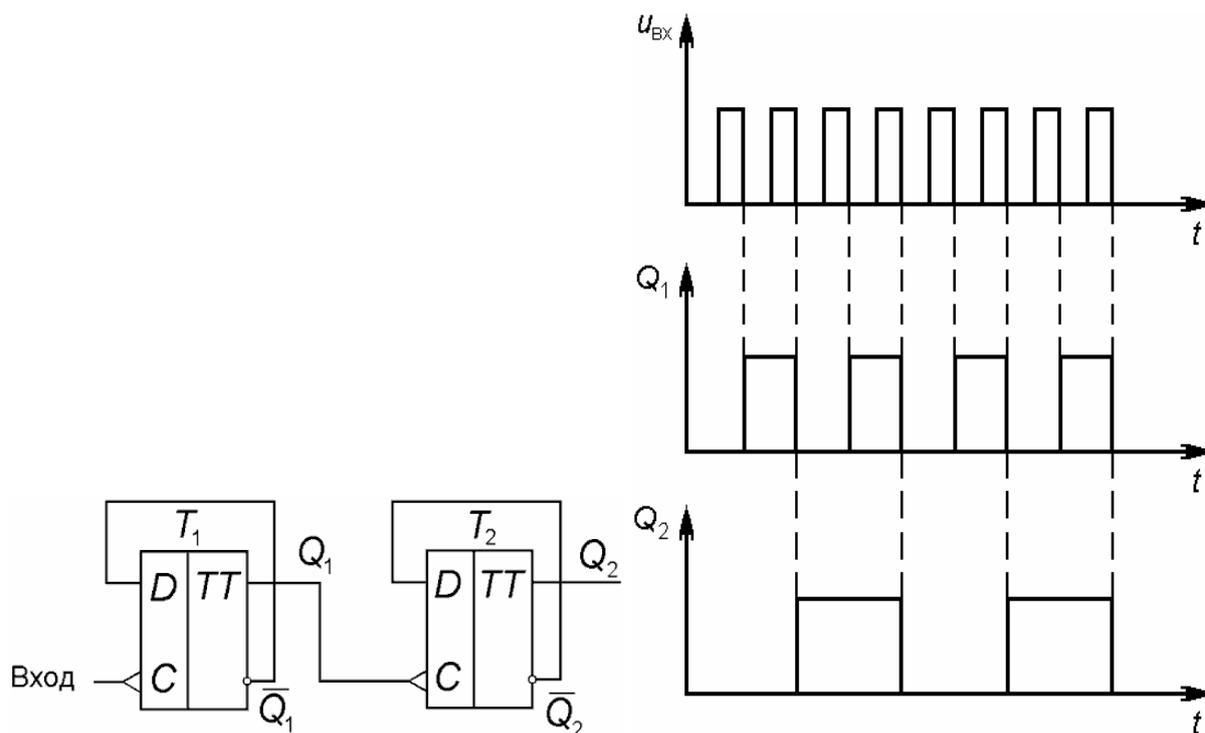


Рис. 15.5. Применение D -триггера для деления частоты

Первый триггер переключается срезами каждого входного импульса. Второй триггер переключается срезами выходных импульсов, снимаемых с выхода Q_1 первого триггера. Для каждого триггера частота повторения импульсов на выходе триггера поделена, по сравнению с частотой импульсов на входе в два раза. Для последовательно включенных n счетных триггеров на выходе n -триггера частота повторения импульсов снижена в 2^n по сравнению с частотой импульсов на входе первого триггера (для двух последовательно включенных счетных триггеров, изображенных на рис. 15.5, частота повторения импульсов снижена в 4 раза).

Применяемая аппаратура

1. Лабораторный макет.
2. Генератор импульсов Г5.
3. Осциллограф С1.
4. Источник питания стабилизированный.

Описание лабораторного макета

Лабораторный макет включает в свой состав два D -триггера (микросхема К155ТМ2), расширитель импульсов (микросхема К155ИЕ2) и переключатель режимов работы триггеров (тумблер).

На рис. 15.6 изображена функциональная схема лабораторной установки.

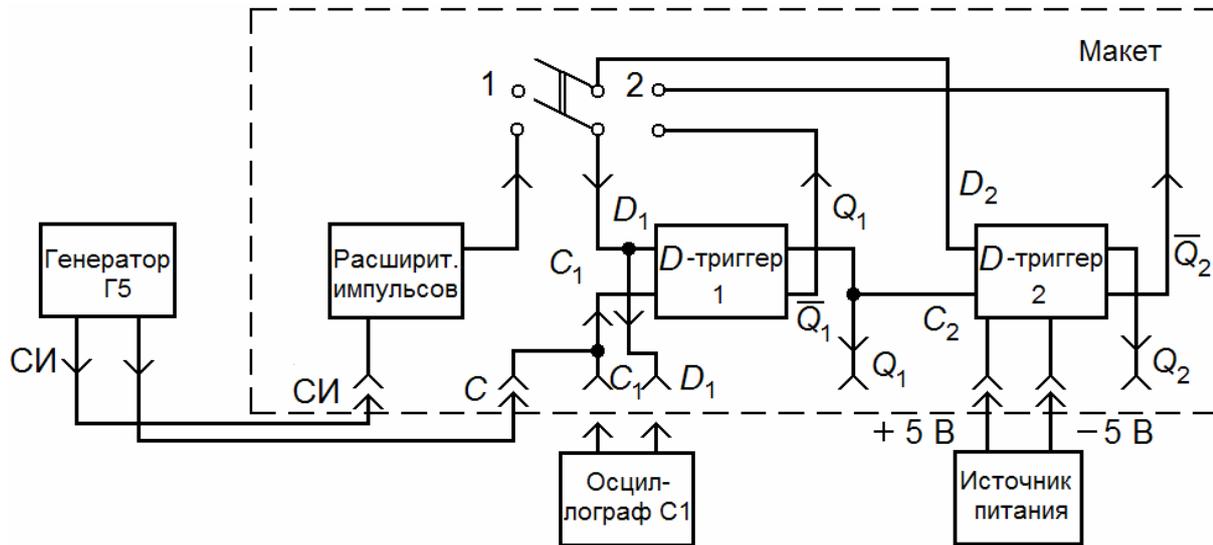


Рис. 15.6. Функциональная схема лабораторной установки

При исследовании работы D -триггера в основном режиме (режим задержки) тумблер стоит в положении 1 (рис. 15.6). При этом на вход D_1 первого триггера подаётся сигнал с расширителя импульсов, который запускается импульсами синхронизации с генератора Г5 (выход СИ). На вход C_1 первого триггера подаются импульсы с основного выхода генератора Г5. Вход D_2 второго триггера отключён. С помощью осциллографа С1 наблюдаются сигналы на клеммах C_1 , D_1 и Q_1 первого триггера.

При исследовании работы D -триггера в счётном режиме тумблер стоит в положении 2 «ВКЛ» (рис. 15.6). Выход расширителя отключён от входа D_1 . Выходы первого и второго триггеров (\bar{Q}_1 и \bar{Q}_2) соединяются соответственно со входами триггеров D_1 и D_2 . На вход C_1 подаются импульсы с основного выхода генератора Г5, на вход C_2 – с выхода Q_1 . С помощью осциллографа С1 наблюдаются сигналы на клеммах C_1 , Q_1 и Q_2 . Напряжение питания 5 В подается на макет от стабилизированного источника питания.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой и подготовиться к работе, для чего:

– выход источника питания подключить к клеммам +5 В, -5 В (источник питания не включать до проверки схемы преподавателем);

– соединить выход синхронизирующих импульсов СИ генератора Г5 с клеммой СИ макета, а основной выход генератора Г5 – с клеммой С макета;

– вход осциллографа С1 соединить с клеммой D₁ макета;

– тумблер на макете поставить в положение «Выключено» (исследуется основной режим работы D-триггера – режим задержки).

2.2. После проверки схемы преподавателем подать питание от сети ~ 220 В на используемые в работе приборы. На выходе источника питания установить напряжение 5 В. Установить параметры выходных импульсов генератора Г5: $T=0,5$ мс; $t_u=10$ мкс; $U_m=3$ В; D (задержка)=80 мкс.

2.3. Убедиться в работоспособности схемы, наблюдая сигналы на экране осциллографа, и привести в отчёте осциллограммы напряжений на входах D₁, С₁ и выходе Q₁ триггера.

2.4. Используя осциллограммы, записать в табл. 15.1 значения сигналов (0 или 1) на выходе Q₁, исходя из данных комбинаций сигналов на входах D₁ и С₁.

Т а б л и ц а 15.1

D ₁	С ₁	Q ₁	Q ₁
		теоретическое	экспериментальное
1	0		
1	1		
0	0		
0	1		

2.5. Исследовать работу D-триггера в основном режиме (задержки), для чего:

– измерить время задержки $t_{зад}$ импульсов на выходе Q₁ относительно импульсов на входе D₁ и сравнить с задержкой D , установленной на генераторе Г5 (задержка импульсов, снимаемых с основного выхода генератора, относительно импульсов синхронизации, снимаемых с выхода СИ генератора); результат измерения занести в табл. 8.2;

– последовательно устанавливая на генераторе Г5 время задержки $D = 60, 40$ и 20 мкс, измерить $t_{зад}$ импульсов на выходе Q₁ относительно импульсов на входе D₁ с помощью осциллографа; результаты измерений занести в табл.15.2.

Т а б л и ц а 15.2

D, мкс Г5	80	60	40	20
$t_{зад}$, мкс измер.				

2.6. Исследовать работу D -триггера в счётном режиме, для чего:

- тумблер на макете поставить в положение «ВКЛ»;
- наблюдать на осциллографе и привести в отчёте осциллограммы на входе C_1 и выходе Q_1 триггера;
- измерить период входных импульсов (на C_1 -входе), длительность и период выходных импульсов (на Q_1 -выходе); результаты измерений занести в табл. 15.3.

Т а б л и ц а 15.3

Входные импульсы		Выходные импульсы		
$T_{\text{вх}}$, мкс	$F_{\text{вх}}$, кГц	t_u , мкс	T , мкс	F , кГц

2.7. Исследовать схему делителя частоты повторения импульсов, для чего:

- наблюдать на осциллографе и привести в отчёте осциллограммы на входе C_1 и выходе Q_1 первого триггера и выходе Q_2 второго триггера;
- измерить период повторения импульсов на C_1 -входе и на Q_1 - и Q_2 -выходах; результаты измерений занести в табл. 15.4.

Т а б л и ц а 15.4

Входные импульсы		Выходные импульсы			
		Q_1		Q_2	
$T_{\text{вх}}$, мкс	$F_{\text{вх}}$, кГц	T , мкс	F , кГц	T , мкс	F , кГц

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень используемых в работе приборов.
3. Схема лабораторной установки.
4. Осциллограммы, таблицы с результатами измерений.
5. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Как устроен одноступенчатый D -триггер на логических элементах?
2. Как работает одноступенчатый D -триггер на логических элементах?
3. Как устроен двухступенчатый D -триггер на логических элементах?
4. Как работает двухступенчатый D -триггер на логических элементах в основном режиме (задержки)?
5. Как работает двухступенчатый D -триггер в счётном режиме?
6. Как устроен делитель частоты повторения импульсов на счетных D -триггерах?

Лабораторная работа №16 ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель работы: овладеть техникой измерения основных параметров электрических сигналов с помощью универсального электронного осциллографа.

1. Общие теоретические сведения

Электронный осциллограф предназначен для исследования электрических сигналов путём визуального наблюдения формы сигналов и измерения их временных и амплитудных значений.

Электронный осциллограф состоит из следующих основных частей: электроннолучевой трубки, канала вертикального отклонения, канала горизонтального отклонения. В электроннолучевой трубке сформированный электронной пушкой и сфокусированный электронный луч проходит между вертикально-отклоняющимися Y -пластинами и между горизонтально-отклоняющимися X -пластинами. Если на эти пластины не воздействуют напряжения, то электронный луч падает на экран трубки и создаёт в центре экрана светящуюся точку.

Исследуемый сигнал $u_{вх}$ подаётся на вход канала вертикального отклонения, который усиливает сигнал до необходимой величины перед поступлением его на вертикально-отклоняющие пластины трубки. Основными частями канала являются: входной делитель напряжения, усилитель вертикального отклонения.

Входной делитель напряжения уменьшает исследуемое напряжение до величины, необходимой для нормальной работы усилителя вертикального отклонения. Когда усиленное напряжение u_y подаётся на вертикально-отклоняющие Y -пластины, а на горизонтально-отклоняющих X -пластинах напряжение $u_x=0$, то электронный луч под действием напряжения u_y отклоняется по вертикали и на экране видна светящаяся вертикальная линия.

Канал горизонтального отклонения служит для формирования и усиления линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения развёртки u_p . Канал состоит из следующих основных частей: синхронизатора, генератора напряжения развёртки u_p , усилителя горизонтального отклонения. Когда усиленное линейно изменяющееся напряжение u_x подаётся на горизонтально-отклоняющие X -пластины, а напряжение $u_y=0$, то электронный луч отклоняется по горизонтали, и на экране трубки видна горизонтальная линия.

Теперь рассмотрим воздействие на соответствующие отклоняющие пластины трубки сразу двух напряжений: u_y , u_x . При исследовании перио-

дических напряжений для получения на экране неподвижного изображения исследуемого сигнала необходимо, чтобы периоды напряжений развёртки и исследуемого сигнала были равны или кратны, т.е. $T_y = nT_x$. Тогда обеспечивается синхронизация напряжений u_y и u_x , а на экране будет неподвижное изображение исследуемого сигнала с n -периодами, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Синхронизация создаётся с помощью синхронизатора, который вырабатывает прямоугольные импульсы, обеспечивающие устойчивый запуск генератора напряжения развёртки. Наибольшее применение находит так называемая внутренняя синхронизация, когда на вход синхронизатора воздействует исследуемое напряжение. Обычно синхронизация в осциллографе осуществляется с помощью двух регулировок: «Стабильность» (изменяется период напряжения развёртки T_p) и «Уровень» (изменяется амплитуда прямоугольных импульсов синхронизатора). Теперь рассмотрим методику измерения с помощью осциллографа амплитуды и длительности исследуемого сигнала.

Рассмотрим линейные перемещения электронного луча по экрану трубки соответственно по вертикали l_y и по горизонтали l_x пропорциональными напряжениями u_y и u_x , которые приложены к соответствующим отклоняющим пластинам.

$$l_y = S_y u_y = S_y K_d K_y u_{вх} ;$$

$$l_x = S_x u_x = S_x K_x \frac{du_p}{dt} t ,$$

где S_y, S_x – чувствительность трубки соответственно по вертикали и горизонтали, т.е. перемещение луча по вертикали и по горизонтали, когда соответствующее отклоняющее напряжение (u_y или u_x) равно 1 В;

K_y, K_x – коэффициент усиления соответственно усилителя вертикального и усилителя горизонтального отклонения;

K_d – коэффициент деления входного делителя;

$\frac{du_p}{dt}$ – скорость изменения напряжения генератора развёртки;

t – текущее время в пределах $0 \leq t \leq T_p$.

Из выше приведенных формул можно найти цены деления соответственно по вертикали и горизонтали экрана:

$$\frac{u_{вх}}{l_y} = \frac{1}{S_y K_d K_y} \left(\frac{\text{ВТ}}{\text{см}} \right);$$

$$\frac{t}{l_x} = \frac{1}{S_x K_x} \frac{du_p}{dt} \left(\frac{c}{cm} \right).$$

Параметры S_y , S_x , K_x – постоянны, коэффициент K_y выставляется максимальным. Тогда цена деления по вертикали изменяется только при изменении коэффициента деления входного делителя K_d , а цена деления по горизонтали – при изменении скорости $\frac{du_p}{dt}$. На передней панели осциллографа для каждого значения K_d указывается цена деления по вертикали, а для каждого значения $\frac{du_p}{dt}$ указывается цена деления по горизонтали. Зная эти цены деления (клетки), можно легко определить амплитуду и длительность исследуемого сигнала.

Применяемая аппаратура

1. Электронный осциллограф типа С1.
2. Электронный вольтметр типа В7 (В3).
3. Вольтметр детекторной системы.
4. Генератор сигнала типа Г3.
5. Генератор сигнала типа Г5.
6. Коммутационный щиток.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с расположением и назначением органов управления измерительных генераторов, осциллографа и электронного вольтметра.

2.2. Собрать схему согласно рис. 16.1.

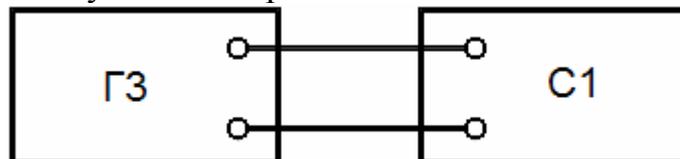


Рис. 16.1. Схема эксперимента для исследования формы выходного сигнала генератора Г3

Исследовать форму выходного сигнала генератора при трёх различных положениях ручки регулировки выходного напряжения генератора Г3: 20 мВ, 0,5 В, 5 В и при трёх частотах: 100 Гц, 1000 Гц, 10000 Гц. Зарисовать полученные осциллограммы и сделать вывод о форме напряжения, генерируемого измерительным генератором.

2.3. Собрать схему согласно рис. 16.2.

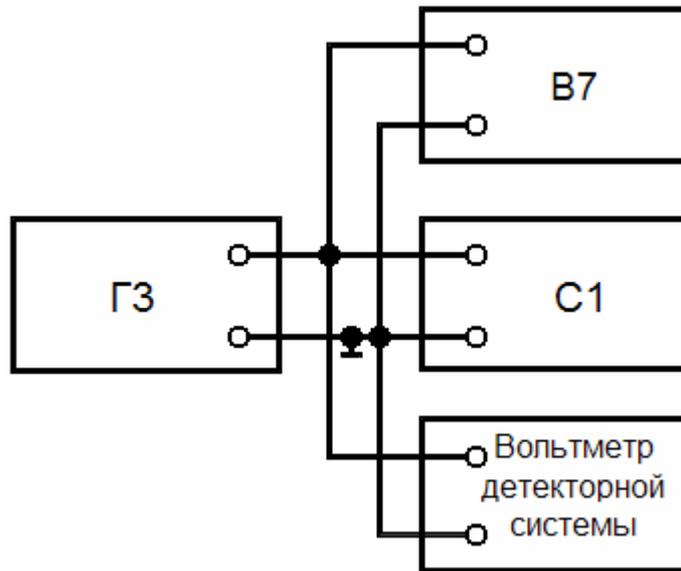


Рис. 16.2. Схема эксперимента при измерении напряжений различными приборами

Измерить при различных частотах генератора ГЗ напряжение на его выходе тремя различными приборами. Напряжение на выходе генератора поддерживать постоянным. Результаты занести в табл. 16.1.

Принимая в качестве эталонного прибора электронный вольтметр, оценить погрешности измерений на различных частотах приборами разных систем и сделать вывод о диапазоне частот, в котором можно пользоваться данными приборами.

Таблица 16.1

Наименование измерительного прибора	2 кГц	20 кГц	200 кГц
	$U, В$	$U, В$	$U, В$
Электронный вольтметр			
Осциллограф			
Вольтметр детекторной системы			

2.4. Собрать схему согласно рис. 16.3.

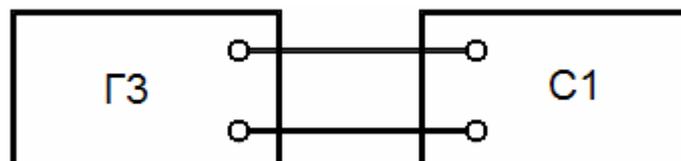


Рис. 16.3. Схема эксперимента при измерении частоты исследуемого напряжения

С помощью осциллографа измерить длительность периода синусоидального напряжения и рассчитать его частоту. С генератора ГЗ подавать сигналы с частотами: 2 кГц, 20 кГц, 200 кГц. Данные измерений и расчёта свести в табл. 16.2 и оценить погрешность.

Т а б л и ц а 16.2

Частота генератора, кГц	Измеренная частота, кГц	Погрешность, %
2		
20		
200		

2.5. Собрать схему согласно рис. 16.3, но вместо ГЗ подключить Г5.

Исследовать форму выходного сигнала генератора Г5 и измерить амплитуду, длительность импульсов, а также их период. Рассчитать частоту повторения импульсов. Данные занести в табл. 16.3.

Проанализировать погрешности измерений.

Т а б л и ц а 16.3

Заданные величины			Измеренные величины			
Длительность импульса, мкс	Частота повторения, кГц	Амплитуда импульса, мкс	Длительность импульса, мкс	Частота повторения, кГц	Период повторения, мкс	Амплитуда импульса, В
4	1	10				
7	2	15				
10	3	20				

6. Собрать схему согласно рис. 16.4.

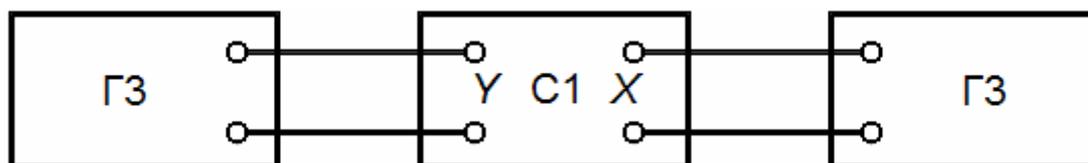


Рис. 16.4. Схема эксперимента для получения фигур Лиссажу

По осциллографу с помощью фигур Лиссажу проверить градуировку одного генератора, считая второй генератор эталонным.

Результаты занести в табл. 16.4.

Т а б л и ц а 16.4

Частота эталонного генератора	Фигура Лиссажу	Частота исследуемого генератора

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень используемых приборов.
3. Схемы экспериментов.
4. Осциллограммы, результаты измерений, сведённые в таблицы.
5. Выводы по экспериментам.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные элементы универсального электронного осциллографа?
2. Что такое синхронизация в осциллографе?
3. С помощью каких регулировок обеспечивается синхронизация в осциллографе?
4. Какова цена деления в осциллографе по вертикали и что можно определить, зная эту цену деления?
5. Какова цена деления в осциллографе по горизонтали и что можно определить, зная эту цену деления?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Общая электротехника и электроника. Ч.1. Электроника [Текст]: учебник / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2015.
2. Электротехника и электроника [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2014.
3. Основы теории расчета линейных электрических цепей и электро-снабжения объектов [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2012.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	6
Лабораторная работа № 1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	14
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R -, L -, C -ЭЛЕМЕНТОВ ...	22
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R -, L -, C -ЭЛЕМЕНТОВ.....	30
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ	34
Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ.....	42
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	46
Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ	52
Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ...	61
Лабораторная работа №9. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА.....	68
Лабораторная работа №10. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ЗАТВОРОМ В ВИДЕ p - n -ПЕРЕХОДА	76
Лабораторная работа №11. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ТРАНЗИСТОРЕ.....	82
1. Общие теоретические сведения	82

Лабораторная работа №12. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ.....	90
Лабораторная работа №13. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	102
Лабораторная работа №14. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ.....	110
Лабораторная работа №15. ИССЛЕДОВАНИЕ D-ТРИГГЕРА.....	120
Лабораторная работа №16. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	127
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	133

Учебное издание

Пинт Эдуард Михайлович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам

по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология»

Редактор М.А. Сухова

Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 29.08.16. Формат 60×84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,5. Тираж 80 экз.

Заказ №560.

Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.