МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Лабораторный практикум по курсу «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений

УДК 621.3(075) ББК 321я73 Л12

Лабораторный практикум по курсу «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»: Учебное пособие. / А.Б. Воронов, М.А. Сухова, Е.М. Мигунова, Д.В. Поплавская. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 240 с.

Практикум предназначен для студентов специальности 140815 «Радиационная безопасность». В практикуме содержатся краткие теоретические сведения, необходимые для правильного выполнения лабораторных работ, порядок проведения работы, указан предпочтительный комплект требуемого оборудования и компонентов, требования по оформлению отчёта, контрольные вопросы и тесты для проверки усвоенного материала

Пособие подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент: с.н.с., доцент, проф. НИЯУ МИФИ В.М. Белопольский

ISBN 978-5-7262-1596-9 © Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2012

Редактор Е.Н. Кочубей

Формат 60х84 1/16. Печ.л. 15,0. Изд. № 1/23.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». 115409, Москва, Каширское ш., 31

Содержание

Предисловие	4
Общие положения	6
Часть 1. Электротехника	
Приборы и установки, применяемые в практикуме	11
Лабораторная работа 1. Знакомство с лабораторной базой	45
Лабораторная работа 2. Исследование электрических цепей	
с последовательным и параллельным соединением резисторов	48
Лабораторная работа 3. Исследование последовательного,	
параллельного и смешанного соединения конденсаторов	54
Лабораторная работа 4. Изучение законов кирхгофа	
в применении к многоконтурной электрической цепи	58
Лабораторная работа 5. Исследование цепи переменного тока	
с последовательным соединением активного сопротивления и емкости	61
Лабораторная работа 6. Исследование резонанса токов	
Лабораторная работа 7. Исследование трехфазной цепи	
при соединении приемников энергии по схеме «звезда»	76
Часть 2. Электроника	, 0
Вариант І. Виртуальное схемотехническое моделирование в системе	
ELECTRONICS WORKBENCH	84
Лабораторная работа 8. Исследование характеристик полупроводникового диода	
Лабораторная работа 9. Исследование работы стабилитрона	
Лабораторная работа 10. Исследование тиристоров	
Лабораторная работа 11. Исследование транзисторов	
Лабораторная работа 12. Исследование входных и выходных	,
характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой	11
Лабораторная работа 13. Исследование транзистора в схеме с ОЭ	121
Лабораторная работа 14. Исследование входных и выходных	121
характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером	125
Лабораторная работа 15. Исследование резистивного усилителя	123
напряжения низкой частоты на транзисторе	134
Лабораторная работа 16. Исследование дифференциальных и мостовых усилителей	143
Лабораторная работа 17. Исследование основных свойств и параметров	1 13
операционных усилителей и компаратора	150
Лабораторная работа 18. Исследование триггера	
Лабораторная работа 19. Исследование работы мультивибратора	
Вариант II. Описания лабораторных работ при оснащении лаборатории	
оборудованием «электронная лаборатория ELVIS II»	184
Лабораторная работа 20. Определение типа и формы сигнала	10 .
на выходе регулируемого источника питания	192
Лабораторная работа 21. Измерение вольт-амперной характеристики двухполюсника	
Лабораторная работа 22. Анализ сигнала произвольной формы	170
с помощью осциллографа и спектроанализатора	199
Лабораторная работа 23. Тахометр	
Лабораторная работа 24. Определение колебательных характеристик	20)
цифрового датчика времени	211
Лабораторная работа 25. Частотный отклик базовой электрической схемы	11
операционного усилителя	214
Лабораторная работа 26. Тестирование электрического пассивного	17
RC-контура с помощью осциллографа	218
Лабораторная работа 27. Использование цифровой синхронизации	
Лабораторная работа 28. Измерение температуры	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Электротехника и электроника» специальности 140815 «Радиационная безопасность» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования относится к профессиональному циклу (общепрофессиональная дисциплина) и обеспечивает овладение студентами компетенциями, соответствующими основным видам профессиональной деятельности.

1. Проведение радиационных измерений с использованием оборудования и систем радиационного контроля:

- планирование и проведение измерений радиационных параметров, отбор и подготовка проб технологических сред и объектов окружающей среды;
 - контроль за соблюдением процесса радиационных измерений;
- контроль за состоянием защиты от излучений в процессе выполнения работ;
 - обеспечение выполнение работ по дезактивации.

2. Техническое обслуживание и метрологические испытания средств радиационного контроля:

- проведение наладки, настройки, регулировки и опытной проверки средств радиационного контроля;
- выполнение дефектации оборудования радиационного контроля, вывод оборудования в ремонт, ввод оборудования в работу или резерв;
 - сбор и подготовка образцов для метрологических испытаний;
 - метрологические испытания приборов.

Лабораторный практикум по дисциплине «Электротехника и электроника» предназначен для формирования умений:

- подбирать устройства электронной техники, электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками;
- правильно эксплуатировать электрооборудование и механизмы передачи движения технологических машин и аппаратов;
 - рассчитывать параметры электрических, магнитных цепей;
- снимать показания и пользоваться электроизмерительными приборами и приспособлениями;
 - собирать электрические схемы;
 - читать принципиальные, электрические и монтажные схемы,
 что позволяет студентам овладеть названными компетенциями.

Лабораторные занятия проводятся рассредоточено, после освоения необходимого теоретического материала.

Практикум охватывает следующие разделы: «Цепи постоянного тока», «Однофазные цепи переменного тока», «Трехфазные цепи», «Электрические измерения», «Основы электроники».

В описании каждой работы приведены:

- 1) краткие теоретические сведения, необходимые для правильного выполнения лабораторных работ;
 - 2) порядок проведения работы;
- 3) указан предпочтительный комплект требуемого оборудования и компонентов;
 - 4) требования по оформлению отчёта;
 - 5) контрольные вопросы;
 - 6) тесты для проверки усвоенного материала.

При выполнении лабораторной работы студенты должны стремиться достичь поставленную цель:

- убедиться в правильности теоретических положений, рассмотренных на лекционных занятиях;
 - повторить и закрепить теоретический материал;
 - получить практический опыт сборки электрических схем;
 - получить практический опыт прочтения обозначений и маркировок:
 - получить практический навык работы с электрооборудованием;
 - научиться снимать показания измерительных приборов;
 - получить практический опыт обработки данные;
 - научиться делать выводы об исследуемых процессах;
 - научиться составлять отчеты о проводимых исследованиях;
- получить практические навыки по настройке и контролю за работой электрического оборудования;
- получить практические навыки по технике безопасности при работе с электроустановками.

Учебное пособие подготовлено применительно к лаборатории общей электротехники и электроники, рассчитанной на одну учебную группу и с учетом наличия различного по функциональности оборудования.

В настоящем практикуме предусматривается проведение лабораторных занятий «фронтальным методом», т. е. студенты учебной группы выполняют одну и ту же работу одновременно.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При работе в лаборатории электротехники и электроники во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования при выполнении лабораторных работ студент должен строго выполнять следующие правила внутреннего распорядка и техники безопасности:

- 1. Приступая в лаборатории к работе, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.
- 2. Студенты обязаны не только строго выполнять эти правила, но и требовать неуклонного выполнения их от своих товарищей.
- 3. После ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписаться в соответствующем журнале.
- 4. При работе в лаборатории категорически запрещается приносить с собой вещи и предметы, загромождающие рабочие места, способствующие созданию условий, могущих привести к нарушению правил техники безопасности.
- 5. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому.
- 6. Приступая к работе в лаборатории, в случае одновременного выполнения нескольких лабораторных работ студенческая группа делится на бригады, которые распределяются по разным лабораторным стендам для одновременного выполнения лабораторных работ.
- 7. Лабораторная работа, пропущенная студентом, выполняется при наличии у студента допуска от администрации с указанием даты выполнения лабораторной работы.
- 8. Сборку электрической цепи производят соединительными проводами при выключенном напряжении питания в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме, обеспечивая при этом надежность электрических контактов всех разъемных соединений.

- 9. Приступая к сборке электрической цепи, необходимо убедиться в том, что к цепи не подано напряжение.
- 10. При сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались петлями. Приборы и электрооборудование расставляются так, чтобы было удобно ими пользоваться.
- 11. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю или лаборанту.
- 12. Включение электрической цепи под напряжение (после проверки) производится только с разрешения и в присутствии преподавателя или лаборанта.
- 13. При обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю или лаборанту.
- 14. Переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания.
- 15. Запрещается прикасаться к оголенным токоведущим частям электрической цепи, находящимся под напряжением пальцами, карандашами и иными предметами.
- 16. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, могущий быть причиной поражения электрическим током.
- 17. При обнаружении повреждений электрического оборудования и приборов стенда, а также при появлении дыма, специфического запаха или искрения необходимо немедленно выключить напряжение питания стенда и известить об этом преподавателя или лаборанта.
- 18. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.
- 19. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания. При потере сознания и остановке дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Подготовка к лабораторным работам. Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в течение отведенного для этого времени. Для выполнения работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

- 1) заранее ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;
- 2) ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит ее основная цель и задание;
- 3) по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;
- 4) подготовить бланк отчета. В нем записать название, номер и дату проведения работы. Указать свою фамилию, инициалы, номер группы. Заранее нанести в соответствующие части отчета: необходимые схемы, графики и иные, требуемые графические материалы и данные, таблицы наблюдений и расчетные формулы;
- 5) неподготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Выполнение лабораторных работ. Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если студент (экспериментатор) отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты. Важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований.

1. Перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его характеристиками¹, а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы.

-

¹ Основными характеристиками оборудования являются значения тока, напряжения и мощности, на которые рассчитаны соответствующие электротехнические устройства и измерительное оборудование.

- 2. Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Вначале соединить все элементы цепи, включаемые последовательно, а затем параллельно. Электрические цепи, включаемые параллельно, рекомендуется соединять проводами другого цвета.
- 3. После окончания сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки преподавателю. Включать цепь, подавать в электрическую цепь напряжение разрешается только с разрешения преподавателя или дежурного лаборанта.
- 4. Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро.
- 5. Результаты измерений заносятся студентом в отчет по лабораторной работе.
- 6. После выполнения отдельного этапа лабораторной работы результаты опыта вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи.
- 7. Выключение цепи, снятие поданного рабочего напряжения производится после разрешения преподавателя.
- 8. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой разрешается только преподавателем.
- 9. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок.
- 10. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Ходить по помещению, входить и выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

Требования к составлению отчета. Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной работе студенты составляют отчет, руководствуясь следующими положениями:

- 1) указать название и порядковый номер лабораторной работы
- 2) сформулировать цель работы
- 3) указать тип и номинальные данные устройств, а также типы, номера, пределы измерений, класс точности и системы измери-

тельных приборов, используемых при выполнении лабораторной работы (например: амперметр типа M42100, № 01985, магнитоэлектрической системы, 30 делен., предел измерений 3A, кл. 1,5);

- 4) схемы и графики исполнять с помощью трафарета радиоинженера или циркуля и линейки с соблюдением принятых стандартных условных обозначений;
- 5) графические зависимости дать в прямоугольной системе координат в масштабе, с равномерными шкалами; произвольный перенос начала координат не допускается; на графиках необходимо наносить экспериментальные точки;
- 6) отчет по каждой лабораторной работе должен содержать основные выводы.

ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРАКТИКУМЕ

БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Резисторы

Резистор (англ. resistor, от лат. resisto – сопротивляюсь), – пассивный элемент электрической цепи, в идеале характеризуемый только сопротивлением электрическому току, то есть для идеального резистора в любой момент времени должен выполняться закон Ома: мгновенное значение напряжения на резисторе пропорционально току, проходящему через него:

$$U(t) = RI(t)$$
.

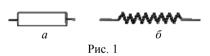
На практике же резисторы в той или иной степени обладают

также паразитной ёмкостью, паразитной индуктивностью и нелинейностью вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Обозначение резисторов на схемах показано на рис. 1: обозначение, принятое в России и Европе (а) и принятое в США (δ) .

Шесть резисторов разных номиналов и точности, промаркированные с помощью цветовой схемы, показаны на рис. 9.

В России условные графические обозначения резисторов на схемах должны соответствовать ГОСТ 2.728-74 (табл. 1).



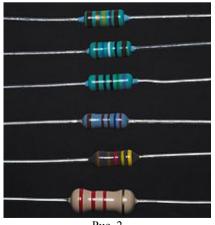


Рис. 2

Таблица 1

Обозначение по ГОСТ 2.728-74	Описание
———	Постоянный резистор без указания номинальной мощности рассеивания
	Постоянный резистор номинальной мощностью рас- сеивания 0,05 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рас- сеивания 0,125 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рас- сеивания 0,25 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рас- сеивания 0,5 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 1 Вт
——————————————————————————————————————	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 2 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 5 Вт

Цепи, состоящие из резисторов. При *последовательном соединении* резисторов их сопротивления складываются (рис. 3):

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

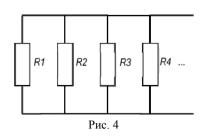
R1 R2 R3

Puc. 3

При *параллельном соединении* резисторов складываются величины, обратно пропорциональные сопротивлению, т.е. общая проводимость $\frac{1}{R}$ складывается из проводимостей каждого резистора $\frac{1}{R}$ (рис. 4);

$$R = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Если цепь можно разбить на вложенные подблоки, последовательно или параллельно включённые между собой, то сначала считают сопротивление каждого подблока, потом заменяют каждый подблок его эквивалентным сопротивлением, находя, таким образом, общее (искомое) сопротивление.

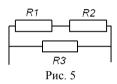


Пример. Схема состоит из двух параллельно включённых блоков (рис. 5), один из них состоит из последовательно включённых резисторов R1 и R2, общим сопротивлением $R_1 + R_2$, другой — из резистора R3, общая проводимость будет равна

$$R = \frac{1}{(R_1 + R_2)} + \frac{1}{R_3} \,,$$

то есть общее сопротивление

$$R = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} \,.$$



Для расчёта таких цепей из резисторов, которые нельзя разбить на блоки последовательно или параллельно соединённые между собой, применяют правила Кирхгофа. Иногда для упрощения расчётов бывает полезно использовать преобразование треугольникзвезда и применять принципы симметрии.

Делитель напряжения (рис.6). Значение напряжения на клеммах делителя напряжения.

$$U_{WY} = U_{WE} \frac{R_1}{(R + R_1)}.$$

Если $R = 9R_1$, то $U_{WY} = 0.1U_{WE}$, то есть про-изойдёт деление входного напряжения в 10 раз.

Классификация резисторов. Резисторы являются элементами электронной аппаратуры и могут применяться как дискретные компоненты или как составные части интегральных микросхем. На рис. 7 показаны три резистора

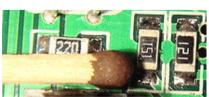


Рис. 7

разных номинала для поверхностного монтажа (SMD) припаянные на печатную плату.

Дискретные резисторы классифицируются по назначению, виду ВАХ, характеру изменения сопротивления, технологии изготовления.

По назначению резисторы подразделяются на:

- резисторы общего назначения;
- резисторы специального назначения;
- высокоомные (сопротивления от десятка МОм до единиц ТОм, рабочие напряжения 100–400 В);
 - высоковольтные (рабочее напряжения десятки кВ);
- высокочастотные (имеют малые собственные индуктивности и ёмкости, рабочие частоты до сотен МГц);
- прецизионные и сверхпрецизионные (повышенная точность, допуск 0,001-1%);
 - нелинейные.

По виду ВАХ бывают резисторы:

- линейные;
- нелинейные;
- варисторы (сопротивление зависит от приложенного напряжения);
 - терморезисторы (сопротивление зависит от температуры);
 - фоторезисторы (сопротивление зависит от освещённости);
- тензорезисторы (сопротивление зависит от деформации резистора);
- магниторезисторы (сопротивление зависит от величины магнитного поля).

По характеру изменения сопротивления резисторы делятся на:

- постоянные;
- переменные регулировочные;
- переменные подстроечные.

По технологии изготовления выделяют:

• проволочные резисторы, которые представляют собой кусок проволоки с высоким удельным сопротивлением, намотанный на какой-либо каркас. Могут иметь значительную паразитную индуктивность. Высокоомные малогабаритные проволочные резисторы иногда изготавливают из микропровода;

- плёночные металлические резисторы в виде тонкой плёнки металла с высоким удельным сопротивлением, напылённой на керамический сердечник, на концы сердечника надеты металлические колпачки с проволочными выводами. Иногда для повышения сопротивления в плёнке прорезается винтовая канавка. Это наиболее распространённый тип резисторов;
- металлофольговые резисторы, в которых в качестве резистивного материала используется тонкая металлическая лента;
- угольные резисторы, использующие высокое удельное сопротивление графита. Бывают плёночными и объёмными;
- интегральные резисторы, в которых используется сопротивление слаболегированного полупроводника. Эти резисторы могут иметь большую нелинейность ВАХ. В основном применяются в составе интегральных микросхем, где применить другие типы резисторов невозможно или не технологично.

Резисторы, выпускаемые промышленностью, и их маркировка. Выпускаемые промышленностью резисторы одного и того же номинала имеют разброс сопротивлений. Значение возможного разброса определяется точностью резистора. Выпускают резисторы с точностью 20 %, 10 %, 5 % и т. д. вплоть до 0,01 %.

Номиналы резисторов не произвольны: их значения выбираются из специальных номинальных рядов, наиболее часто из номинальных рядов Е6 (20%), Е12 (10%) или Е24 (для резисторов с точностью до 5%), для более точных резисторов используются более точные ряды (например, Е48).

Резисторы, выпускаемые промышленностью, характеризуются также определённым значением максимальной рассеиваемой мощности (выпускаются резисторы мощностью 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5 Вт).

Маркировка резисторов с проволочными выводами. Резисторы особенности малой мощности — чрезвычайно мелкие детали. Резистор мощностью 0,125 Вт имеет длину несколько миллиметров и диаметр порядка миллиметра. Прочитать на такой детали номинал с десятичной запятой невозможно. Поэтому при указании номинала вместо десятичной точки пишут букву, соответствующую единицам измерения (К — для килоомов, М — для мегаомов, Е или R

для единиц Ом). Например, 4K7 обозначает резистор, сопротивлением 4,7 кОм, 1R0-1 Ом, 120K-120 кОм и т. д. Однако и в таком виде читать номиналы трудно. Поэтому для особо мелких резисторов применяют маркировку цветными полосками.

Для резисторов с точностью 20 % используют маркировку с тремя полосками, для резисторов с точностью 10 и 5 % маркировку с четырьмя полосками, для более точных резисторов с пятью или шестью полосками. Первые две полоски всегда означают первые два знака номинала. Если полосок три или четыре, то третья полоска означает десятичный множитель, то есть степень десятки, которая умножается на двузначное число, указанное первыми двумя полосками. Если полосок четыре, последняя указывает точность резистора. Если полосок пять, то третья означает третий знак со-



противления, четвёртая — десятичный множитель, пятая — точность. Шестая полоска, если она есть, указывает температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Если эта полоска в 1,5 раза шире остальных, то она указывает надёжность резистора (% отказов на 1000 ч работы)

Следует отметить, что иногда встречаются резисторы с пятью полосами (рис. 8), но стандартной (5

или $10\,\%$) точностью. В этом случае первые две полосы задают первые знаки номинала, третья — множитель, четвёртая — точность, а пятая — температурный коэффициент. Цветовая кодировка резисторов представлена в табл. 2.

Пример. Допустим, на резисторе нанесены четыре полосы: коричневая, чёрная, красная и золотая. Первые две полоски дают 10, третья 100, четвёртая даёт точность 5 %, итого резистор сопротивлением $10\cdot100~\mathrm{Om}=1~\mathrm{kOm}$, с точностью $\pm5~\%$.

Запомнить цветную кодировку резисторов нетрудно: после чёрной 0 и коричневой 1 идёт последовательность цветов радуги. Так как маркировка была придумана в англоязычных странах, голубой и синий цвета не различаются.

Таблина 2

Цвет	чис-	Десятичный	Точность,	TKC,	%
	ло	множитель	%	ppm/°C	отка-
					30B
Серебристый	_	$1 \cdot 10^{-2} = \langle 0,01 \rangle$	10	ı	_
Золотой	_	$1 \cdot 10^{-1} = \langle 0, 1 \rangle$	5	_	_
Чёрный	0	$1 \cdot 10^0 = 1$	_	_	_
Коричневый	1	$1 \cdot 10^1 = ((10))$	1	100	1
Красный	2	$1 \cdot 10^2 = \ll 100$ »	2	50	0,1
Оранжевый	3	$1 \cdot 10^3 = \langle (1000) \rangle$	_	15	0,01
Жёлтый	4	$1 \cdot 10^4 = \ll 10\ 000$ »	_	25	0,001
Зелёный	5	$1 \cdot 10^5 = (100\ 000)$	0,5	_	_
Синий	6	$1 \cdot 10^6 = $ «1 000 000»	0,25	10	_
Фиолетовый	7	$1 \cdot 10^7 = $ «10 000 000»	0,1	5	_
Серый	8	$1 \cdot 10^8 = \ll 100\ 000\ 000 \gg$	_	_	_
Белый	9	$1 \cdot 10^9 = $ «1 000 000 000»	_	1	_
Отсутствует	_	_	20 %	_	_

Поскольку резистор – симметричная деталь, может возникнуть вопрос: начиная с какой стороны читать полоски? Для четырёхполосной маркировки обычных резисторов с точностью 5 и 10 % вопрос решается просто: золотая или серебряная полоска всегда стоит в конце. Для трёхполосочного кода первая полоска стоит ближе к краю резистора, чем последняя. Для других вариантов важно, чтобы получалось значение сопротивления из номинального ряда, если не получается, нужно читать наоборот. (Для резисторов МЛТ-0,125 производства СССР с 4 полосками, первой является полоска, нанесённая ближе к краю; обычно она находится на металлическом стаканчике вывода, а остальные три – на более узком керамическом теле резистора.)

Особый случай использования цветовой маркировки резисторов – перемычки нулевого сопротивления. Они обозначаются одной чёрной (0) полоской по центру. (Использование таких резистороподобных перемычек вместо дешёвых кусков проволоки объясняется желанием производителей сократить расходы на перенастройку сборочных автоматов.)

Маркировка SMD-резисторов. «Резисторы» нулевого сопротивления (перемычки на плате) кодируются одной цифрой «0».

Кодирование 3 или 4 цифрами:

- ABC обозначает AB•10[°] Ом; например: 102 это 10•10[°] Ом = 1 кОм;
- ABCD обозначает ABC• $10^{\rm D}$ Ом, точность 1 % (ряд E96), например: 1002 это 100• $10^{\rm 2}$ Ом = 10 кОм.

Кодирование цифра-цифра-буква (JIS-C-5201): ряд Е96, точность 1 %.

Мантисса m значения сопротивления кодируется 2 цифрами (табл. 3), степень при 10 кодируется буквой. Например: 09R = 12,1 Ом; 80E = 6,65 МОм; все 1 %.

$$S = 10^{-2}$$
; R или $X = 10^{-1}$;
 $A = 10^{0} = 1$; $B = 10^{1}$;
 $C = 10^{2}$; $D = 10^{3}$;
 $E = 10^{4}$: $F = 10^{5}$.

Кодирование буква-цифра-цифра: ряды E24 и E12, точность 2, 5 и 10 % (ряд E48 не используется).

Таблица 3

Код	m										
01	100	17	147	33	215	49	316	65	464	81	681
02	102	18	150	34	221	50	324	66	475	82	698
03	105	19	154	35	226	51	332	67	487	83	715
04	107	20	158	36	232	52	340	68	499	84	732
05	110	21	162	37	237	53	348	69	511	85	750
06	113	22	165	38	243	54	357	70	523	86	768
07	115	23	169	39	249	55	365	71	536	87	787
08	118	24	174	40	255	56	374	72	549	88	806
09	121	25	178	41	261	57	383	73	562	89	825
10	124	26	182	42	267	58	392	74	576	90	845
11	127	27	187	43	274	59	402	75	590	91	866
12	130	28	191	44	280	60	412	76	604	92	887
13	133	29	196	45	287	61	422	77	619	93	909
14	137	30	200	46	294	62	432	78	634	94	931
15	140	31	205	47	301	63	442	79	649	95	953
16	143	32	210	48	309	64	453	80	665	96	976

Степень при 10 кодируется буквой (так же, как для 1 %-ных сопротивлений, см. список выше), мантисса m значения сопротивления и точность кодируется двумя цифрами (табл. 4).

Таблина 4

	2	%			5	%		10	%
Код	m								
01	100	13	330	25	100	37	330	49	100
02	110	14	360	26	110	38	360	50	120
03	120	15	390	27	120	39	390	51	150
04	130	16	430	28	130	40	430	52	180
05	150	17	470	29	150	41	470	53	220
06	160	18	510	30	160	42	510	54	270
07	180	19	560	31	180	43	560	55	330
08	200	20	620	32	200	44	620	56	390
09	220	21	680	33	220	45	680	57	470
10	240	22	750	34	240	46	750	58	560
11	270	23	820	35	270	47	820	59	680
12	300	24	910	36	300	48	910	60	820

Примеры:

- 2%, 1,00 OM = S01;
- 5%, 1,00 Om = S25;
- 5%, 510 Om = A42;
- 10 %, 1,00 O_M = S49;
- 10 %, 820 kOm = D60.

Электрические конденсаторы

Конденсатор (от лат. condense — «уплотнять», «сгущать») — двухполюсник с определённым значением ёмкости и малой омической проводимостью; устройство для накопления заряда и энергии электрического поля.

Первый конденсатор — «лейденская банка» был изобретен голландским учёным Питером ван Мушенбруком и его учеником Кюнеусом в 1745 г. в Лейдене (Голландия). Параллельно и независимо от них сходный аппарат, под названием «медицинская банка» изобрёл немецкий учёный Клейст.



Конденсатор является пассивным электронным компонентом. Обычно состоит из двух электродов в форме пластин (называемых *обкладками*), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок (рис. 9).

Свойства конденсатора. Конденсатор в цепи постоянного тока может проводить ток в момент включения его в цепь (происходит заряд или перезаряд конденсатора), по окончании переходного процесса ток через конденсатор не течёт, так как его обкладки раз-

делены диэлектриком. В цепи же переменного тока он проводит колебания переменного тока посредством циклической перезарядки конденсатора, замыкаясь так называемым током смещения.

С точки зрения метода комплексных амплитуд конденсатор обладает комплексным импедансом

$$\hat{Z}_C = \frac{1}{i\omega C},$$

где i — мнимая единица, ω — частота протекающего синусоидального тока, C — ёмкость конденсатора. Отсюда также следует,

что реактивное сопротивление конденсатора равно $X_C = -\frac{1}{\omega C}$.

Для постоянного тока частота равна нулю, следовательно, реактивное сопротивление конденсатора бесконечно (в идеальном случае).

При изменении частоты (f) изменяются диэлектрическая проницаемость диэлектрика и степень влияния паразитных параметров — собственной индуктивности и сопротивления потерь. На высоких частотах любой конденсатор можно рассматривать как последовательный колебательный контур, образуемый ёмкостью C, собственной индуктивностью L_C и сопротивлением потерь R_{Π} .

Резонансная частота конденсатора равна

$$f_{\rm p} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C C}} \ .$$

При $f > f_{\rm p}$ конденсатор в цепи переменного тока ведёт себя как катушка индуктивности. Следовательно, конденсатор целесообразно использовать лишь на частотах $f < f_{\rm p}$, на которых его сопротив-

ление носит ёмкостный характер. Обычно максимальная рабочая частота конденсатора примерно в 2–3 раза ниже резонансной.

Конденсатор может накапливать электрическую энергию. Энергия заряженного конденсатора:

$$E = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$
,

где U – напряжение (разность потенциалов), до которого заряжен конденсатор.

Обозначение конденсаторов на схемах. В России условные графические обозначения конденсаторов на схемах должны соответствовать ГОСТ 2.728-74 либо международному стандарту IEEE 315–1975 (табл. 5).

Подстроечный конденсатор переменной ёмкости

Таблица 5

На электрических принципиальных схемах номинальная ёмкость конденсаторов обычно указывается в микрофарадах (1 мк $\Phi=10^6$ п Φ) и пикофарадах, но нередко и в нанофарадах. При ёмкости не более 0,01 мк Φ , ёмкость конденсатора указывают в пикофарадах, при этом допустимо не указывать единицу измерения, то есть постфикс «п Φ » опускают.

При обозначении номинала ёмкости в других единицах указывают единицу измерения. Для электролитических конденсаторов, а также для высоковольтных конденсаторов на схемах, после обозначения номинала ёмкости, указывают их максимальное рабочее напряжение в вольтах (В) или киловольтах (кВ). Например, так: «10 мк·10 В». Для переменных конденсаторов указывают диапазон изменения ёмкости, например, так: «10-180».

Характеристики конденсаторов. Рассмотрим основные параметры конденсаторов.

 \ddot{E} мкость характеризует способность конденсатора накапливать электрический заряд. В обозначении конденсатора указывают значение номинальной ёмкости. Заряд на обкладке пропорционален напряжению между обкладками q=CU. Типичные значения ёмкости конденсаторов составляют от единиц пикофарад до сотен микрофарад. Однако существуют конденсаторы (ионисторы) с ёмкостью до десятков фарад.

Ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга, в системе СИ рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d}$$
,

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами (в вакууме равна единице), ε_0 — электрическая постоянная, численно равная $8,854187817...\cdot 10^{-12}$ (эта формула справедлива, лишь когда d много меньше линейных размеров пластин).

Для получения больших ёмкостей конденсаторы соединяют параллельно. При этом напряжение между обкладками всех конденсаторов одинаково. Общая ёмкость батареи *параллельно* соединённых конденсаторов (рис. 10) равна сумме ёмкостей всех конденсаторов, входящих в батарею:

$$C = \sum_{i=1}^{N} C_i$$
 или $C = C_1 + C_2 + ... + C_n$.

Если у всех параллельно соединённых конденсаторов расстояние между обкладками и свойства диэлектрика одинаковы, то

эти конденсаторы можно представить как один большой конденсатор, разделённый на фрагменты меньшей площади.

При последовательном соединении конденсаторов заряды всех конденсаторов одинаковы, так как от источника питания они поступают только на внешние электроды, а на внутренних электродах они получаются только за счёт разделения зарядов, ранее нейтрализовавших друг друга.

Общая ёмкость батареи последовательно соединённых конденсаторов (рис. 11) равна

$$\begin{array}{c|c}
\hline
& C1 \\
\hline
& C2 \\
\hline
& Puc. 11 \\
\hline
& 1 \\
& 1 \\
\hline
& 1 \\
& 1
\end{array}$$

1) равна
$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{C_i}}$$
 или $C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.

Эта ёмкость всегда меньше минимальной ёмкости конденсатора, входящего в батарею. Однако при последовательном соединении уменьшается возможность пробоя конденсаторов, так как на каждый конденсатор приходится лишь часть разницы потенциалов источника напряжения.

Если площадь обкладок всех конденсаторов, соединённых последовательно, одинакова, то эти конденсаторы можно представить в виде одного большого конденсатора, между обкладками которого находится стопка из пластин диэлектрика всех составляющих его конденсаторов.

Удельная ёмкость – отношение ёмкости к объёму (или массе) диэлектрика. Максимальное значение удельной ёмкости достигается при минимальной толщине диэлектрика, однако при этом уменьшается его напряжение пробоя.

Плотность энергии электролитического конденсатора зависит от конструктивного исполнения. Максимальная плотность достигается у больших конденсаторов, где масса корпуса невелика по сравнению с массой обкладок и электролита. Например, у конденсатора EPCOS B4345 ёмкостью $12000 \text{ мк}\Phi \times 450 \text{ B}$ и массой 1,9 кг плотность энергии составляет 639Дж/кг или 845Дж/л.

Номинальное напряжение — значение напряжения, обозначенное на конденсаторе, при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах.

Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. При эксплуатации напряжение на конденсаторе не должно превышать номинального. Для многих типов конденсаторов с увеличением температуры допустимое напряжение снижается, что связано с увеличением тепловой скорости движения носителей заряда и, соответственно, снижению требований для образования электрического пробоя.

Полярность. Многие конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические) функционируют только при корректной полярности напряжения из-за химических особенностей взаимодействия электролита с диэлектриком. При обратной полярности напряжения электролитические конденсаторы обычно выходят из строя из-за химического разрушения диэлектрика с последующим увеличением тока, вскипанием электролита внутри и, как следствие, с вероятностью взрыва корпуса. Разрушение возможно из-за действия температуры и напряжения, не соответствовавших рабочим параметрам, или старения. На рис. 12 показаны современные конденсаторы, разрушившиеся без взрыва из-за специально разрывающейся конструкции верхней крышки.



Рис. 12

Опасность разрушения (взрыва). Взрывы электролитических конденсаторов — довольно распространённое явление. Основной причиной взрывов является перегрев конденсатора, вызываемый в большинстве случаев утечкой электролита или повышением эквивалентного последовательного сопротивления вследствие старения (актуально для импульсных устройств).

В современных компьютерах перегрев конденсаторов – также очень частая причина выхода их из строя, когда они стоят рядом с источниками повышенного тепловыделения (радиаторы охлаждения).

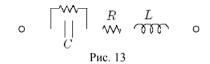
Для уменьшения повреждений других деталей и травматизма персонала в современных конденсаторах большой ёмкости уста-

навливают клапан или выполняют насечку на корпусе (часто можно заметить её в форме буквы X, K или T на торце, иногда на больших конденсаторах она прикрыта пластиком). При повышении внутреннего давления открывается клапан или корпус разрушается по насечке, испарившийся электролит выходит в виде едкого газа и иногда даже жидкости, и давление спадает без взрыва и осколков.

В старых электролитических конденсаторах никаких защит от взрыва не было. Взрывная сила частей корпуса может быть достаточно большой и травмировать человека.

Паразитные параметры. Реальные конденсаторы, помимо ёмкости, обладают также собственными сопротивлением и индуктивностью. С высокой степенью точности эквивалентная схема реального конденсатора представлена на рис. 13:

- C собственная ёмкость конденсатора;
- r сопротивление изоляции конденсатора;



- R эквивалентное последовательное сопротивление;
 - L эквивалентная последовательная индуктивность.

Сопротивление изоляции — это сопротивление конденсатора постоянному току, определяемое соотношением $r = U / I_{yr}$, где U — напряжение, приложенное к конденсатору, I — ток утечки.

Эквивалентное последовательное сопротивление R (ЭПС, англ. ESR) обусловлено главным образом электрическим сопротивлением материала обкладок и выводов конденсатора и контакта(ов) между ними, а также потерями в диэлектрике. Обычно ЭПС возрастает с увеличением частоты тока, протекающего через конденсатор.

В большинстве случаев этим параметром можно пренебречь, но иногда (например, в случае использования электролитических конденсаторов в фильтрах импульсных блоков питания) достаточно малое его значение может быть жизненно важным для надёжности устройства (см., например, Capacitor plague (англ.)).

Существуют специальные приборы (ESR-метры) для измерения этого достаточно важного параметра конденсатора, по которому можно часто определить пригодность его дальнейшего использования в определённых целях.

Этот параметр, кроме собственно ёмкости (ёмкость – это основной параметр) – часто имеет решающее значение в исследовании состояния старого конденсатора: стоит ли использовать его в определённой схеме, или он прогнозируемо выйдет за пределы допустимых отклонений.

Эквивалентная последовательная индуктивность L обусловлена в основном собственной индуктивностью обкладок и выводов конденсатора. На низких частотах (до единиц килогерц) обычно не учитывается в силу своей незначительности.

Саморазряд. С течением времени конденсатор теряет энергию за счёт саморазряда.

Тангенс угла потерь — отношение мнимой и вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon_{im}}{\varepsilon_{re}} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_{a}}$$

Потери энергии в конденсаторе определяются потерями в диэлектрике и обкладках. При протекании переменного тока через конденсатор векторы напряжения и тока сдвинуты на угол

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta,$$

где δ — угол диэлектрических потерь. При отсутствии потерь δ = 0 тангенс угла потерь определяется отношением активной мощности $P_{\rm a}$ к реактивной $P_{\rm p}$ при синусоидальном напряжении определённой частоты. Величина, обратная $\tan(\delta)$, называется dofpomhocmbo конденсатора. Термины добротности и тангенса угла потерь применяются также для катушек индуктивности и трансформаторов.

Температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ) — относительное изменение ёмкости при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия (Кельвина). Таким образом, значение ёмкости от температуры представляется линейной формулой:

$$C(T) = C_{H,V} - TKE \cdot C_{H,V} \Delta T$$
,

где ΔT – увеличение температуры в °C или К относительно нормальных условий, при которых специфицировано значение ёмкости.

TKE применяется для характеристики конденсаторов со значительной линейной зависимостью ёмкости от температуры. Однако ТКЕ определяется не для всех типов конденсаторов. Конденсаторы,

имеющие нелинейную зависимость ёмкости от температуры, и конденсаторы с большими уходами ёмкости от воздействия температуры окружающей среды в обозначении имеют указание на относительное изменение ёмкости в рабочем диапазоне температур.

Диэлектрическое поглошение. Если заряженный конденсатор быстро разрядить до нулевого напряжения путём подключения низкоомной нагрузки, а затем снять нагрузку и наблюдать за напряжением на выводах конденсатора, то мы увидим, что напряжение медленно повышается. Это явление получило название диэлектрического поглошения (или адсорбиии электрического заряда). Конденсатор ведёт себя так, словно параллельно ему подключено множество последовательных RC-цепочек с различной постоянной времени. Интенсивность проявления этого эффекта зависит в основном от свойств диэлектрика конденсатора. Подобный эффект можно наблюдать и на большинстве электролитических конденсаторов, но в них он является следствием химических реакций между электролитом и обкладками. Наименьшим диэлектрическим поглощением обладают конденсаторы с органическими диэлектриками: тефлон (фторопласт), полистирол, полиэтилентерефталат, поликарбонат.

Классификация конденсаторов. Основная классификация конденсаторов проводится по типу диэлектрика в конденсаторе. Тип диэлектрика определяет основные электрические параметры конденсаторов: сопротивление изоляции, стабильность ёмкости, величину потерь и др.

По виду диэлектрика различают конденсаторы:

- вакуумные (обкладки без диэлектрика находятся в вакууме);
- с газообразным диэлектриком;
- с жидким диэлектриком;
- с твёрдым неорганическим диэлектриком: стеклянные (стеклоэмалевые, стеклокерамические, стеклоплёночные), слюдяные, керамические, тонкослойные из неорганических плёнок;
- с твёрдым органическим диэлектриком: бумажные, металлобумажные, плёночные, комбинированные бумажноплёночные, тонкослойные из органических синтетических плёнок;
- электролитические и оксидно-полупроводниковые конденсаторы. Такие конденсаторы отличаются от всех прочих типов, прежде всего, своей огромной удельной ёмкостью.

В качестве диэлектрика используется оксидный слой на металлическом аноде. Вторая обкладка (катод) — это или электролит (в электролитических конденсаторах), или слой полупроводника (в оксидно-полупро-водниковых), нанесённый непосредственно на оксидный слой. Анод изготовляется, в зависимости от типа конденсатора, из алюминиевой, ниобиевой или танталовой фольги или спечённого порошка.

На рис. 14 показаны плёночный конденсатор для навесного монтажа (a) и керамический подстроечный конденсатор (δ) .



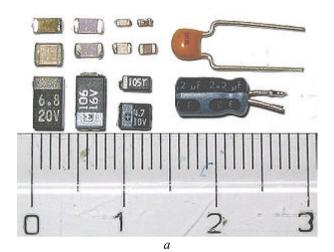


Рис. 14

Конденсаторы различаются по возможности изменения своей ёмкости:

- постоянные конденсаторы основной класс конденсаторов, не меняющие своей ёмкости (кроме как в течение срока службы);
- переменные конденсаторы конденсаторы, которые допускают изменение ёмкости в процессе функционирования аппаратуры. Управление ёмкостью может осуществляться механически, электрическим напряжением (вариконды, варикапы) и температурой (термоконденсаторы). Применяются, например, в радиоприёмниках для перестройки частоты резонансного контура;
- подстроечные конденсаторы конденсаторы, ёмкость которых изменяется при разовой или периодической регулировке и не изменяется в процессе функционирования аппаратуры. Их используют для подстройки и выравнивания начальных ёмкостей сопрягаемых контуров, для периодической подстройки и регулировки цепей схем, где требуется незначительное изменение ёмкости.

На рис. 15, a слева показаны конденсаторы для поверхностного монтажа; справа — конденсаторы для объёмного монтажа; сверху — керамические; снизу — электролитические. На полярных SMD конденсаторах «+» обозначен полоской. На рис. 15, δ показаны различные конденсаторы для объёмного монтажа.



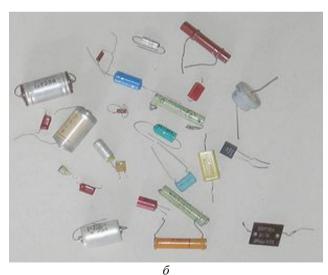


Рис. 15

Таблица 6

Вид конденсатора	Ёмкость	Электрическое поле	Схема
	$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$	$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}$	d"A
Цилиндрический	$C = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$	$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \varepsilon_0 \varepsilon_r A}$	C R.
	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$	$E(r) = \underbrace{Q}_{j}$	R,
	$C=4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R_1$	4π′-۳ ₀ 8, A	3

В зависимости от назначения можно условно разделить конденсаторы на конденсаторы общего и специального назначения. Конденсаторы общего назначения используются практически в большинстве видов и классов аппаратуры. Традиционно к ним относят наиболее распространённые низковольтные конденсаторы, к которым не предъявляются особые требования. Все остальные конденсаторы являются специальными. К ним относятся высоковольтные, импульсные, помехоподавляющие, дозиметрические, пусковые и другие конденсаторы.

Также различают конденсаторы по форме обкладок: плоские, цилиндрические, сферические и другие (табл. 6).

Применение конденсаторов. Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники.

Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.

При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах с оптической накачкой, и т. п.

Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии.

В промышленной электротехнике конденсаторы используются для компенсации реактивной мощности и в фильтрах высших гармоник.

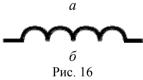
Конденсаторы способны накапливать большой заряд и создавать большую напряжённость на обкладках, которая используется для различных целей, например, для ускорения заряженных частиц или для создания кратковременных мощных электрических разрядов.

Измерительный преобразователь (ИП) малых перемещений: малое изменение расстояния между обкладками очень заметно сказывается на ёмкости конденсатора. ИП влажности воздуха, древесины (изменение состава диэлектрика приводит к изменению ёмкости).

Измеритель уровня жидкости. Непроводящая жидкость, заполняет пространство между обкладками конденсатора, и ёмкость конденсатора меняется в зависимости от уровня.

Катушка индуктивности





Катушка индуктивности — это винтовая, спиральная или винтоспиральная катушка из свёрнутого изолированного проводника, обладающая значительной индуктивностью при относительно малой ёмкости и малом активном сопротивлении. Такая система способна накапливать магнитную энергию при протекании электрического тока.

Устройство обычно представляет собой винтовую, спиральную или винтоспиральную катушку из одножильного или многожильного изолированного провода, намотанного на цилиндрический, тороидальный или прямоугольный каркас из диэлектрика или плоскую спираль, волну или полоску печатного или другого проводника (рис. 16, а). Также бывают и бескаркасные катушки. Намотка может быть как однослойной (рядовая и с шагом), так и много-

слойная (рядовая, внавал, "универсал"). Намотка "универсал" имеет меньшую паразитную ёмкость.

Для увеличения индуктивности применяют сердечники из ферромагнитных материалов: электротехнической стали, пермаллоя, карбонильного железа, ферритов. Также сердечники используют для изменения индуктивности катушек в небольших пределах.

Обозначение на электрических принципиальных схемах показано на рис. 16, δ .

Свойства катушки индуктивности. Катушка индуктивности в электрической цепи хорошо проводит постоянный ток и в то же время оказывает сопротивление переменному току, поскольку при изменении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая этому изменению.

Катушка индуктивности обладает реактивным сопротивлением, величина которого равна:

$$X_L = \omega L$$
,

где L — индуктивность катушки, ω — циклическая частота протекающего тока. Соответственно, чем больше частота тока, протекающего через катушку, тем больше её сопротивление.

При протекании тока катушка запасает энергию, равную работе, которую необходимо совершить для установления текущего тока I. Величина этой энергии равна

$$\mathring{A}_{\tilde{\mathfrak{m}}\tilde{\mathfrak{o}}\tilde{\mathfrak{o}}} = \frac{1}{2}LI^2.$$

При изменении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, значение которой рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$
.

Характеристики катушки индуктивности.

Индуктивность – основной параметр катушки, который определяет, какой поток магнитного поля создаст катушка при протекании через неё тока силой 1 А. Типичные значения индуктивностей катушек – от десятых долей мк Γ н до десятков Γ н.

Индуктивность катушки пропорциональна линейным размерам катушки, магнитной проницаемости сердечника и квадрату числа витков намотки. Индуктивность катушки, намотанной на тороидальном сердечнике

$$L = \mu_0 \mu_i S_c \frac{N^2}{l_c},$$

где μ_0 — магнитная постоянная, μ_i — магнитная проницаемость материала сердечника (зависит от частоты), $S_{\rm c}$ — площадь сечения сердечника, $l_{\rm c}$ — длина средней линии сердечника, N — число витков.

При последовательном соединении катушек общая индуктивность равна сумме индуктивностей всех соединённых катушек.

$$L = \sum_{i=0}^{N} L_i .$$

При параллельном соединении катушек общая индуктивность равна

$$L = \frac{1}{\sum_{i=0}^{N} \frac{1}{L_i}}.$$

Сопротивление потерь. В катушках индуктивности помимо основного эффекта взаимодействия тока и магнитного поля наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых сопротивление катушки не является чисто реактивным. Наличие паразитных эффектов ведёт к появлению потерь в катушке, оцениваемых сопротивлением потерь. Потери складываются из потерь в проводах, диэлектрике, сердечнике и экране.

Потери в проводах могут быть вызваны тремя причинами:

- во-первых, провода обмотки обладают омическим (активным) сопротивлением;
- во-вторых, сопротивление провода обмотки переменному току возрастает с ростом частоты, что обусловлено скин-эффектом, суть которого состоит в том, что ток протекает не по всему сечению проводника, а по кольцевой части поперечного сечения;
- в-третьих, в проводах обмотки, свитой в спираль, проявляется эффект близости, суть которого состоит в вытеснении тока под воздействием вихревых токов и магнитного поля к периферии провода, прилегающей к каркасу, в результате чего сечение, по которому протекает ток, принимает серповидный характер, что ведёт к дополнительному возрастанию сопротивления провода.

Потери в диэлектрике обусловлены тем, что между соседними витками катушки существует паразитная ёмкость, что приводит к утечкам переменного тока между витками.

Потери в сердечнике складываются из потерь на вихревые токи, потерь на гистерезис и начальных потерь.

Потери в экране обусловлены тем, что ток, протекающий по катушке, индуцирует ток в экране.

Добромность катушки индуктивности определяет отношение между активным и реактивным сопротивлениями катушки. Добротность рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{\omega L}{R_{\text{righ}}}.$$

Практически величина добротности лежит в пределах от 30 до 200. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями.

Температурный коэффициент индуктивности (ТКИ, ТКL) – это параметр, характеризующий зависимость индуктивности катушки от температуры.

Температурная нестабильность индуктивности обусловлена рядом факторов: при нагреве увеличивается длина и диаметр провода обмотки, увеличивается длина и диаметр каркаса, в результате чего изменяются шаг и диаметр витков; кроме того при изменении температуры изменяется диэлектрическая проницаемость материала каркаса, что ведёт к изменению собственной ёмкости катушки.

$$TKL = \frac{\Delta L}{L\Delta T}.$$

Разновидности катушек индуктивности.

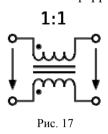
Контурные катушки индуктивности используются совместно с конденсаторами для получения резонансных контуров. Они должны иметь высокую стабильность, точность и добротность.

Катушки связи применяются для обеспечения индуктивной связи между отдельными цепями и каскадами. Такая связь позволяет разделить по постоянному току цепи базы и коллектора и т. д. К таким катушкам не предъявляются жёсткие требования на добротность и точность, поэтому они выполняются из тонкого провода в виде двух обмоток небольших габаритов. Основными параметрами этих катушек являются индуктивность и коэффициент связи.

Вариометры – катушки, индуктивность которых можно изменять в процессе эксплуатации. Они используются для перестройки колебательных контуров. Состоят из двух катушек, соединённых последовательно. Одна из катушек неподвижная (статор), другая располагается внутри первой и вращается (ротор). При изменении положения ротора относительно статора изменяется величина взаимоиндукции, а следовательно, индуктивность вариометра. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4 – 5 раз. В ферровариометрах индуктивность изменяется перемещением ферромагнитного сердечника.

Дроссели – катушки индуктивности, обладающие высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному. Обычно включаются в цепях питания усилительных устройств. Предназначены для защиты источников питания от попадания в них высокочастотных сигналов. На низких частотах они

используются в фильтрах цепей питания и обычно имеют металлические или ферритовые сердечники.



Совоенные ороссели — это две намотанных встречно катушки индуктивности, используются в фильтрах питания (рис. 17). За счёт встречной намотки и взаимной индукции более эффективны при тех же габаритных размерах. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания; в дифференциальных сигнальных фильтрах циф-

ровых линий, а также в звуковой технике.

Применение катушек индуктивности. Катушки индуктивности (совместно с конденсаторами и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.

Катушки индуктивности используются в импульсных стабилизаторах как элемент, накапливающий энергию и преобразующий уровни напряжения. Две и более индуктивно связанные катушки образуют трансформатор.

Катушка индуктивности, питаемая импульсным током от транзисторного ключа, иногда применяется в качестве источника высокого напряжения небольшой мощности в слаботочных схемах, когда создание отдельного высокого питающего напряжения в блоке питания невозможно или экономически нецелесообразно. В этом случае на катушке из-за самоиндукции возникают выбросы высокого напряжения, которые можно использовать в схеме, например, выпрямив и сгладив.

Катушки используются также в качестве электромагнитов; источника энергии для возбуждения индуктивно-связанной плазмы; для радиосвязи (излучение и приём электромагнитных волн) в виде магнитной, кольцевой (дукционная петля), рамочной антенн, антенн вертикальной поляризации (DDRR); для разогрева электропроводящих материалов в индукционных печах; как датчик перемещения: изменение индуктивности катушки может изменяться в широких пределах перемещением (вытаскиванием) сердечника.

Катушка индуктивности используется в индукционных датчи-

ках магнитного поля. Индукционные магнитометры были разработаны и широко использовались во времена Второй мировой войны.

На рис. 18 показана катушка индуктивности, применявшаяся в качестве реактивного сопротивления для люминесцентных ламп.



Рис. 18

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Классификация электроизмерительных приборов. Электроизмерительные приборы классифицируются по следующим признакам:

- 1) по роду измеряемой величины амперметры, вольтметры, омметры и т.д.;
- 2) по принципу действия магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, тепловые, электронные и т. д.;
- 3) по роду тока приборы постоянного, переменного, постоянного и переменного тока;
- 4) по степени точности 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 классов.

На шкале или на лицевой панели прибора указываются: назначение, род тока, положение шкалы (горизонтально, вертикально, под углом), пробивное напряжение изоляции, класс точности, условия эксплуатации, год выпуска, заводской номер.

Обозначения электроизмерительных приборов:

A – амперметр M Ω – мегаомметр

mA – миллиамперметр W – ваттметр

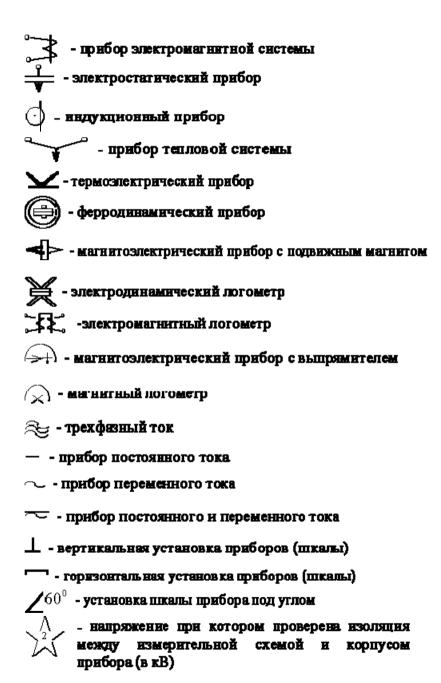
V – вольтметр Wh – счётчик ватт-часов

mV – милливольтметр $H_{z-\text{частотометр}}$

 Ω – омметр G – гальванометр

- прибор магнитоэлектрической системы

- прибор электродинамической системы



1,5 - класс точности прибора 1,5

знак красного цвета "Осторожно! Прочность изолящии не соответствует нормам"

Обозначения зажимов:

- - отрицательный зажим
- 🕂 положительный зажим
- сбщий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов)

_____ - зажим, соединенный с корпусом ____ - зажим для заземления

При необходимости, значение того или иного символа следует посмотреть в справочнике или в таблице, которая имеется в лаборатории.

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии подвижной катушки с током с полем постоянного магнита. На рис. 19 схематически показано устройство такого прибора. В нем магнитное поле создается постоян-

ным магнитом подковообразной формы. Полюсные наконечники N и S обращены друг к другу вогнутыми цилиндрическими поверхностями одинаковых радиусов.

Между полюсами укреплен железный цилиндр меньшего радиуса. В зазоре, где магнитное поле ради-

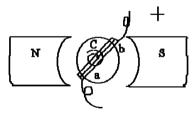
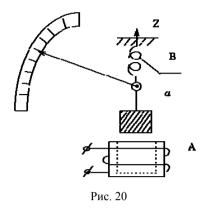


Рис. 19

ально, расположена легкая рамка ab, состоящая из нескольких витков провода, по которому протекает измеряемый ток. Тонкая пружина C удерживает рамку в определенном положении. При $I \neq 0$ рамка поворачивается до тех пор, пока момент сил закрученной пружины не уравновесит момент сил, действующих на рамку в магнитном поле. Стрелка, соединенная с рамкой, указывает угол ее



поворота, который в широких пределах оказывается пропорционален силе тока, поэтому шкала прибора равномерная.

По указанному принципу изготовляется большинство лабораторных и технических приборов постоянного тока. Их можно использовать в качестве амперметров, включая параллельно рамке шунт, или в качестве вольтметров, включая последовательно с рамкой

большое добавочное сопротивление.

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии ферромагнитного сердечника с магнитным полем катушки с током. На рис. 20 схематически показан амперметр такой системы, где A — катушка, по которой течет измеряемый ток, a — железный стержень, подвешенный на пружине b. Катушка с током I создает неоднородное магнитное поле B, при этом на стержень a действует сила

$$F \approx \frac{\partial B}{\partial Z} \approx \frac{\partial M}{\partial Z},\tag{1}$$

где M – намагниченность стержня, Z – ось катушки стержня.

Эта сила втягивает стержень в катушку и уравновешивается силой упругости пружины b. Со стержнем связана стрелка, которая поворачивается при его движении. Каждому значению I соответствует определенный угол α поворота стрелки. Так как $\alpha \neq F$, а между F и I нет линейной зависимости, то и шкала оказывается неравномерной.

Приборы электромагнитной системы могут использоваться как в цепях постоянного тока, так и в цепях переменного тока промышленной частоты 50 кГц. Однако точность их невысока. В приборах электродинамической системы используется взаимодействие двух катушек с токами, одна из которых неподвижна (как и в предыдущем случае), а вторая — подвижна (заменяет ферромагнитный сердечник). При этом если измеряемый ток I проходит последова-

тельно через обе катушки, то угол отклонения стрелки $\alpha = I^2$, так как и магнитный момент 2 подвижной катушки и магнитное поле, создаваемое неподвижной катушкой, прямо пропорциональны I.

Принцип действия приборов тепловой системы основан на удлинении проволоки при

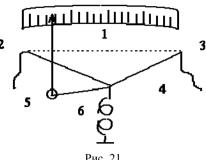


Рис. 21

нагревании. На рис. 21 схематически показано устройство теплового амперметра. Он содержит металлическую проволоку I из неокисляемого упругого материала, концы которой закреплены неподвижно в металлических колодках 2 и 3. В средней части проволока І оттягивается нитью 4, проходящей через блок 5 и скрепленной с пружиной 6. Когда ток проходит по проволоке 1, она нагревается и удлиняется, ее прогиб увеличивается. При этом нить 4 перемещается и поворачивает блок 5 со скрепленной с ним стрелкой на некоторый угол.

В настоящее время широчайшее применение находят электронные приборы, среди которых, помимо электронных ламп, следует упомянуть, прежде всего, электронно-лучевую трубку, используемую в телевизорах и множестве других устройств, также приборы, применение которых основано на свойствах полупроводников, новых магнитных материалов и т.д.

Пусть X – измеряемая величина (сила тока, напряжение, сопротивление и т.п.). Шкала прибора разбивается на то или иное число делений и служит для отсчета Х. Возле делений ставятся цифры, которые обозначают либо число делений от нуля шкалы, либо непосредственно значение X. Значение $X_{\rm H}$ (номинальное значение X, приводящее к отклонению стрелки на всю шкалу) соответствует пределу измерений. Прибор может иметь либо один, либо несколько пределов измерений. Чувствительностью прибора называют величину

$$\rho = \frac{\Delta \phi}{\Delta x},\tag{2}$$

где Δx — изменение X, а $\Delta \phi$ — соответствующий угол поворота стрелки (подвижной части прибора).

Ценой деления называют величину

$$C = \frac{X_n}{n},\tag{3}$$

где n — число делений шкалы.



Для отсчета X по шкале надо цену деления умножить на число отсчитанных делений.

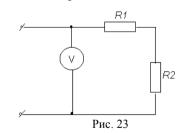
Пусть шкала прибора (рис. 22) имеет 30 делений, а предел измерений – $15~\mathrm{B}$.

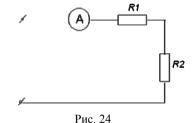
При отклонении стрелки на 14 делений получим для напряжения:

$$U = \frac{X_n}{n} \cdot 14 = \frac{15 \cdot 14}{30} = 7 \text{ B.}$$
 (4)

Схемы включения амперметра, вольтметра, ваттметра показаны на рис. 22–24.

Схема включения вольтметра (рис. 23): вольтметр V соединяется параллельно с приёмником, так как напряжение на приёмнике и на вольтметре должно быть одинаковым.





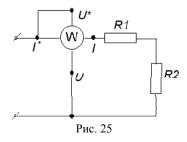


Схема включения амперметра (рис. 24): амперметр А измеряет ток приёмника энергии, поэтому его необходимо соединить последовательно с этим приёмником.

Схема включения ваттметра (рис. 25). Ваттметр – прибор для измерения мощности приёмника имеет две пары

зажимов. Одна пара зажимов последовательной или токовой обмотки $I-I^*$ и одна пара зажимов параллельной обмотки или обмотки напряжения $U-U^*$. Зажимы, отмеченные звездочкой (*), называются генераторными и присоединяются к источнику питания

Оценка погрешностей электрических измерений. Значения измеряемых величин, получаемые с помощью приборов, являются приближенными: если X — истинное значение измеряемой величины, а X_{Π} — показание прибора, то можно лишь утверждать, что

$$X = X_{\Pi} \pm \Delta X_{\Pi}, \tag{5}$$

где ΔX — максимальная абсолютная ошибка прибора. Способ определения ΔX должен быть известен заранее. Для этого на каждом приборе указывается класс точности — число процентов, которое ΔX составляет от номинального значения X_n . Таким образом, класс точности равен $\frac{\Delta X}{X} \cdot 100$, откуда легко найти ΔX .

Рассмотрим пример. Пусть предел измерений амперметра — 20 A ($I_n = 20$ A), на приборе указан класс точности — 1,5. Значит,

$$\frac{\Delta I_{\text{T}}}{I_{\text{T}}} \cdot 100 = 1,5,$$

$$\Delta I_{\text{T}} = \frac{1,5 \cdot 20}{100} = 0,3 \text{ A}.$$

Таким образом, при любом (!) показании амперметра $I_{\rm II}$ для истинного значения силы тока имеем

$$I = I_{\rm n} \pm 0.3 {\rm A}.$$

Если I_{Π} = 3 A, то I = 3 ± 0,3 A.

Если $I_{\pi} = 19$ A, то $I = 19 \pm 0.3$ A.

В случае, когда прибор многопредельный, класс точности, указанный на приборе, относится к каждому пределу. Пусть вольтметр имеет два предела измерения 1 В и 10 В, а класс точности его – 2,5. Тогда при измерениях на первом пределе $\Delta U_{\rm II} = 0,025$ В, а при измерениях на втором пределе $\Delta U_{\rm II} = 0,25$ В.

Так как относительная ошибка измерений равна $\frac{\Delta X_{\scriptscriptstyle \Pi}}{X_{\scriptscriptstyle \Pi}}$, то ясно,

что при наличии нескольких пределов измерений выбирать надо наименьший, при котором стрелка прибора еще "не зашкаливает".

Приборы класса точности до 0,5 включительно применяются для точных измерений и называются прецезионными.

Рекомендуемая литература

- 1. Аксенов А. И., Нефедов А. В. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Конденсаторы. Резисторы. С. 126
 - 2. ITC-Electronics Прецизионные резисторы SMR1DZ и SMR3DZ.
- 3. Бокуняев А. А. и др. Справочная книга радиолюбителя-конструктора. М.: Радио и связь 1990.
- 4. http://www.rfcafe.com/references/electrical/resistor_markings.htm (англ.)
- 5. Резисторы (справочник) / Под ред. И. И. Четверткова. М.: Энерго-издат, 1991
- 6. Аксенов А. И., Нефедов А. В. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры.
 - 7. Конденсаторы. Резисторы: Справочник. М.: Радио и связь, 1995.
- 8. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В. Н. Дулина, М. С. Жука. М.: Энергия, 1978.

Лабораторная работа 1

ЗНАКОМСТВО С ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗОЙ

Цель работы: овладение навыками работы с оборудованием, электроизмерительными приборами и основами техники безопасности при работе с электроустановками.

Теоретическая часть

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с разделом «Основные положения».

У большинства лабораторных приборов числа, стоящие у отметок шкал указывают число делений. На шкале не указывается, какому значению измеряемой величины соответствует то или иное деление шкалы. В этих случаях показания приборов определяется путём умножения отсчёта (числа делений шкалы, указанной стрелкой) на постоянную прибора C.

Постоянная прибора численно равна измеряемой величине, соответствующей одному делению шкалы. Чтобы определить постоянную прибора, нужно номинальную величину прибора, т.е. верхний предел измерения, разделить на число делений шкалы.

Пример. При измерении тока прибором с верхним пределом шкалы 5 А, и числом делений 100, стрелка отклонилась на 17 делений. Постоянная прибора рассчитывается согласно формуле

$$C = \frac{5 \text{ A}}{100 \text{ дел}} = 0,05 \text{ A/дел}.$$

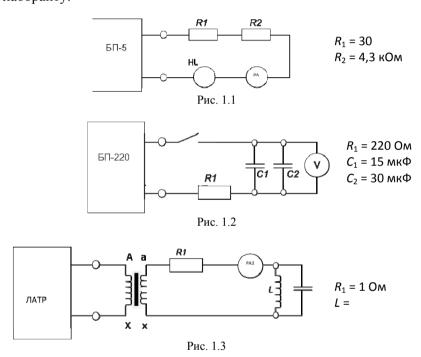
Измеряемая величина I = CX, где X – число делений, показываемое стрелкой, $I = 0.05 \cdot 17 = 0.85$ A.

Задание

Научиться работать с элементной базой электрических цепей и измерительными приборами в лаборатории в соответствии с правилами техники безопасности.

Порядок выполнения работы

- 1. Ознакомиться с элементной базой и электроизмерительными приборами.
- 2. Из полученных каждым студентом омметра, амперметра вольтметра и ваттметра собрать схемы, показанные на рис. 1.1, 1.2, 1.3. Предъявить их для проверки преподавателю или дежурному лаборанту.



4. Зафиксировать значения измерительных приборов и занести их в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Схема замера	Наименование прибора,	Показание прибора
	класс точности	

5. Вычислить постоянные приборов: вольтметр $-60~\mathrm{B}$; амперметр 1 А. И занести их в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Обозначение	Наименование	Тип	Предел	Цена	Класс
	прибора	прибора	измерения	деления	точности
	• •	•	•		

6. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

- 1. Как соединяется с приёмником энергии амперметр, вольтметр и почему?
- 2. Какое должно быть сопротивление амперметра и вольтметра и почему?
 - 3. Как определяют диапазон измерения?
 - 4. Что такое поправка измерения?
 - 5. Что называют приведенной погрешностью?
- 6. Как определяют чувствительность и цену деления вольтметров и амперметров?
 - 7. Дайте определение диапазона рабочих частот вольтметра.
- 8. Как корректируют показания приборов при измерении напряжений и токов?
 - 9. Какие приборы используются для измерения напряжения и тока?
 - 10. Как устроены электромеханические вольтметры и амперметры?

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТОРОВ

Цель работы: составление электрических цепей с последовательным и параллельным соединением резисторов; исследование потери напряжения в проводах.

Теоретическая часть

Последовательное соединение резисторов – это такое соединение, когда к концу одного резистора присоединяется начало другого, к концу второго – начало третьего и т.д. При этом образуется неразветвленная цепь или участок цепи.

Для последовательного соединения характерно то, что во всех этих резисторах возникает одинаковый ток, а падение напряжения в них пропорционально сопротивлению:

$$U_1 = IR_1$$
; $U_2 = IR_2$; $U_3 = IR_3$.

Каждое сопротивление может быть найдено по формулам:

$$R_1 = U_1/I$$
; $R_2 = U_2/I$; $R_3 = U_3/I$.

Падение напряжения на всем участке цепи равно сумме падений напряжений на каждом резисторе:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$
.

Эквивалентное сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений каждого резистора:

$$R_{_{3KB}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Если к концам участка вместо трех резисторов подключить эквивалентный резистор с сопротивлением $R_{\rm экв}$ и подать такое же напряжение U, то в участке установится ток такой же силы I, что и при последовательном соединении резисторов:

$$I = U/R_{2KB} \implies R_{2KB} = U/I$$
.

Мощность резисторов можно определить по формулам:

$$P = UI = I^2 R = U^2 / R$$

Параллельное соединение резисторов – это такое соединение, когда начала всех резисторов соединены в одну точку, а концы – в

другую. Для параллельного соединения характерно одинаковое падение напряжения на каждом резисторе и на всем участке:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U...$$

Сила токов в параллельных ветвях обратно пропорциональна сопротивлениям:

$$I_1 = U/R_1$$
; $I_2 = U/R_2$; $I_3 = U/R_3$.

Каждое сопротивление может быть найдено по формулам:

$$R_1 = U/I_1$$
; $R_2 = U/I_2$; $R_3 = U/I_3$.

Сила токов в неразветвленной цепи равна сумме сил токов всех ветвей:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Эквивалентное сопротивление двух ветвей определяется по формуле:

$$R_{_{\rm ЭKB}} = \frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1} \ .$$

Эквивалентное сопротивление трех ветвей определяется по формуле:

$$R_{_{\rm 3KB}} = \frac{R_{_{1}}R_{_{2}}R_{_{3}}}{R_{_{2}}R_{_{1}} + R_{_{2}}R_{_{3}} + R_{_{3}}R_{_{1}}} \ .$$

Мощность, поглощаемая резисторами при параллельном соединении, можно рассчитать по формулам, аналогичным для последовательного соединения.

Токи в параллельной ветви разветвляются обратно пропорционально сопротивлениям.

Потери напряжения в проводах являются основным фактором, определяющим сечение проводов при передаче и распределении электрической энергии. Впервые теоретическое обоснование возможности передачи энергии на дальнее расстояние по проводам было дано русским учёным Д.А. Логиновым.

Если напряжение в начале линии передачи U_1 и в конце U_2 , то разность $U = U_1 - U_2$ называется потерей напряжения в проводах.

Задания

1. Проверить опытным путем законы Ома последовательного и параллельного соединения резисторов.

2. Определить потери напряжения в проводах опытным и расчётным путём.

Приборы и оборудование

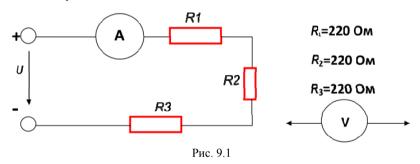
В работе используются:

лабораторный автотрансформатор ЛАТР;

амперметр (IA) - 3 шт.; вольтметр 60 В; резисторы 220 Ом; амперметр O/IA; резисторы R1, R2, R3; вольтметр 250 В.

Порядок проведения работы

2. Собрать электрическую схему в соответствии с рис. 9.1. По-казать ее преподавателю.

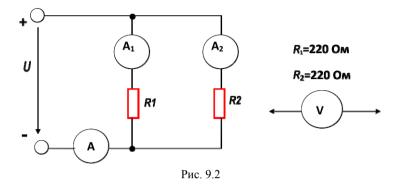


- 3. Установить ток в цепи не более 0,4 А. Для чего необходимо произвести регулировку напряжения на блоке питания ручкой ЛАТРа
- 4. Замерить в цепи: I; U; U1; U2; U3. Результаты замеров записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№		Из	мерен	кин			Вычисления						
Π/Π	I	$I U U_1 U_2 U_3$					R_1	R_2	R_3	P	P_1	P_2	P_3
	Α	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт	Вт	Вт	Вт
1													
2													
3													

5. Собрать электрическую схему в соответствии с рис. 9.2. Показать ее преподавателю.

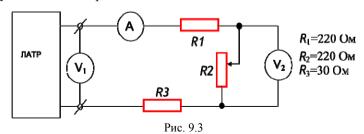


6. Установить ток в неразветвленной цепи не более 0,4 А. Измерив токи: $I; I_1; I_2$, записать показания в табл. 2.2.

Таблица 2.2

№			Изме	рени	Я		Вычисления					
Π/Π	I	I_1	I_2	U	U_1	U_2	R	R_1	R_2	P	P_1	P_2
	Α	Α	Α	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Вт	Вт	Вт
1												
2												
3												

- 7. По полученным данным пп. 4 и 6 подсчитать сопротивления и мощность отдельных резисторов и всей цепи (для последовательного и параллельного сопротивления).
- 8. Собрать схему рис. 9.3. Показать её для проверки преподавателю. Вращая регулятор напряжения ЛАТРа на пульте включения, установить напряжение питания цепи $U_1 = 100$ В.



- 9. По полученным данным пп. 3 и 5 подсчитать сопротивления и мощность отдельных резисторов и всей цепи (для последовательного и параллельного сопротивления).
- 10. Изменяя сопротивление нагрузки R_2 , установить ток в цепи равным 0,3 А. Измерить I, U_2 , результаты записать в табл. 2.3.

Таблина 3.3

	Изме	рения		Вычисления					
№ п/п	I	U_1	U_2	ΔU	ΔU_i	ΔP	η		
	A	В	В	В	В	B_T	%		
1.									
2.									

- 11. Установить ток нагрузки 0,4 A, изменяя сопротивление нагрузки. Измерить I, U_2 , результаты записать во вторую строку табл. 2.3.
- 12. Вычислить потерю напряжения в проводах теоретическим путём, зная, что:

удельное сопротивление материала $p = 10^{-7}$ Ом/м, длина проводника L = 100 м, площадь сечения проводника S = 0.15 мм².

13. Определить для каждого случая мощность потерь в линии:

$$P = IU = I^2R$$
.

- 14. Определить для каждого случая КПД линий.
- 15. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

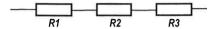
- 1. Елочная гирлянда с последовательным соединением N ламп включена в сеть с напряжением U. Каково будет напряжение на перегоревшей лампе $U_{\text{пер}}$ и на каждой исправной лампе $U_{\text{исп}}$?
- 2. Как изменится ток в электрической цепи на рис. 9.1, если последовательно с резисторами R1–R3 включить резистор R_4 = 4,3 Ом. От чего зависит потеря напряжения в проводах?
 - 3. Каким образом определяется необходимое сечение провода?
 - 4. Как выбирается сечение проводов по допустимому нагреву

5. При каком режиме работы цепи КПД наибольшее?

Контрольные тесты

Тест 1. Для заданной электрической цепи приведены уравнения. Укажите неправильный ответ.

- 1. $R_{3KB} = R_1 + R_2 + R_3$
- 2. $U = U_1 + U_2 + U_3$
- 3. $I = I_1 + I_2 + I_3$



Тест 2. Укажите единицу измерения мощности в системе СИ.

- 1. Bt
- 2. B
- 3. A

Тест 3. Укажите свойства параллельно соединенных приёмников энергии.

- 1. $I = I_1 + I_2 + I_3$
- 2. $U = U_1 + U_2 + U_3$
- 3. $q = q_1 + q_2 + q_3$

Тест 4. Как необходимо включить вольтметр для измерения напряжения на резисторе?

- 1. Последовательно
- 2. Параллельно
- 3. Произвольно

Тест 5. Как изменится напряжение на первом резисторе при параллельной схеме подключения резисторов, если резистор второй закоротить?

- 1. Не изменится
- 2 Увеличится
- 3 Уменьшится

Рекомендуемая литература

- 1. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электроники М.: Высшая школа, 2001.
- 2. Данилов И. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. М.: Высшая школ, 2000.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО, ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: Научиться составлять батареи конденсаторов и определять их емкость.

Теоретическая часть

Существуют три способа соединения конденсаторов в батареи: последовательное, параллельное и смешанное.

Если напряжение цепи превышает рабочее напряжение используемых конденсаторов, то применяется **последовательное соединение** конденсаторов (рис. 3.1).

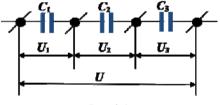


Рис. 3.1

В этом случае общее напряжение батареи

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$
.

Эквивалентная емкость определяется формулой

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \,.$$

Таким образом, уменьшается напряжение на каждом конденсаторе, но и уменьшается общая емкость батареи.

Если необходимо получить емкость, большую емкости одного конденсатора, то соединяется необходимое число конденсаторов

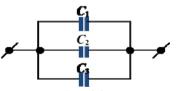


Рис. 3.2

параллельно (рис. 3.2).

В этом случае напряжение на всех конденсаторах одинаковое, а эквивалентная емкость батареи определяется формулой

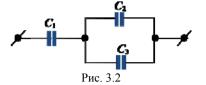
$$C = C_1 + C_2 + C_3$$
.

Если необходимо получить доста-

точную емкость батареи при напряжении цепи, превышающее рабочее напряжение каждого конденсатора, применяется смешанное соединение конденсаторов в батарею (рис. 3.3).

Эквивалентная емкость батареи определяется формулой

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}.$$



Задание

Составить батареи конденсаторов, осуществить параллельное, последовательное и смешанное соединение конденсаторов и определить их емкость.

Приборы и оборудование

- 1. Конденсаторы: $C_1 = 10$ мк Φ , $C_2 = 20$ мк Φ , $C_3 = 30$ мк Φ .
- 2. Амперметр на $I_{\rm H}$ = 1 А.
- 3. Вольтметр $U_{\rm H}$ = 150 В.
- 4. Автотрансформатор ЛАТР.
- 5. Соединительные провода.

При проведении лабораторных работ емкость батареи конденсаторов определяется путем измерения ее емкостного сопротивления переменному току.

Порядок проведения работы

1. Собрать электрическую цепь (рис. 3.4) и показать ее преподавателю.

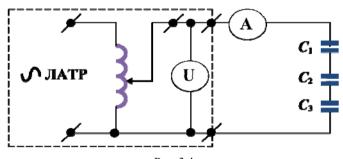


Рис. 3.4

Установить такое напряжение в цепи, чтобы ток I не превышал 1 А. Емкость батареи конденсаторов определяется формулой

$$C = \frac{I \cdot 10^6}{U \cdot 3,14} \text{ мк}\Phi.$$

Определить эту же емкость формулой последовательного соединения конденсаторов и сравнить результаты.

2. Собрать электрическую цепь (рис. 3.5) и показать ее преподавателю.

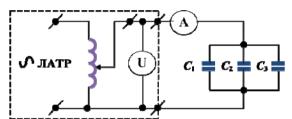
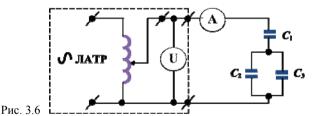


Рис. 3.5

Установить напряжение, чтобы I не превышал 1 А. Определить емкость батареи по формуле $C = \frac{I \cdot 10^6}{U \cdot 3,14}$ мкФ. Определить эту же

емкость по формуле параллельного соединения конденсаторов и сравнить результаты.

3. Собрать электрическую цепь (рис. 3.6) и показать ее преподавателю.



Установить напряжение, чтобы I не превышал 1 А. Определить емкость батареи по формуле $C = \frac{I \cdot 10^6}{U \cdot 3.14}$ мкФ. Определить эту же

емкость по формуле смешанного соединения конденсаторов в батарею.

4. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

- 1. Напишите формулу расчета емкости батареи параллельно соединенных конденсаторов.
- 2. Напишите формулу расчета емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов.
 - 3. Назовите типы диэлектриков.
- 4. Напишите характеристики, которыми, кроме емкости обладает конденсатор.
- 5. Назовите типы конденсаторов по возможности изменения своей емкости.

Литература

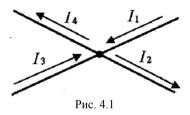
- 1. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электроники. М., Высшая школа, 2001.
- 2. Данилов И. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. М., Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ КИРХГОФА В ПРИМЕНЕНИИ К МНОГОКОНТУРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель работы: применение законов Кирхгофа к многоконтурной электрической цепи.

Теоретическая часть



Разветвленная сеть, состоящая из нескольких замкнутых контуров, питаемых несколькими источниками (рис. 4.1), называется сложной электрической цепью. Одним из способов расчета сложных цепей является при-

менение к ним законов Кирхгофа. Первый закон Кирхгофа сформулирован для узла электрической цепи.

Узел – это точка, в которой сходятся не менее трех ветвей.

Со знаком « + » записываются токи, втекающие в узел,

Со знаком « – » записываются токи, вытекающие из узла.

$$\sum I = 0,$$

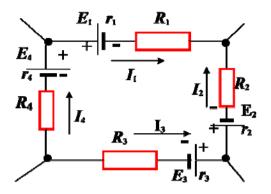
$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4,$$

$$I_1 + I_3 - I_2 - I_4 = 0.$$

Первый закон: АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ СУММА ТОКОВ В УЗЛЕ РАВНА НУЛЮ.

Второй закон: В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ СУММА ЭДС РАВНА АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ СУММЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕТВЯХ КОНТУРА.

В уравнении ЭДС считается положительной, если ее направление совпадает с произвольно выбранным направлением обхода контура (рис. 4.2). Падение напряжения в ветви считается положительным, если направление тока в ней совпадает с положительным направлением обхода.



$$E_1 - E_2 - E_3 + E_4 = I_1 (R_1 + r_1) - I_2 (R_2 + r_2) - I_3 (R_3 + r_3) + I_4 (R_4 + r_4).$$
Puc. 4.2

Порядок расчета сложной электрической цепи:

- 1) задаемся произвольным направлением токов в каждой ветви;
- 2) по первому закону Кирхгофа составляем уравнения, на единицу меньше числа узлов сложной электрической цепи;
- 3) недостающие уравнения составляются по второму закону Кирхгофа. Общее число уравнений должно равняться числу неизвестных токов;
- 4) если некоторые токи получаются отрицательными, то их действительные направления противоположны выбранными.

Задание

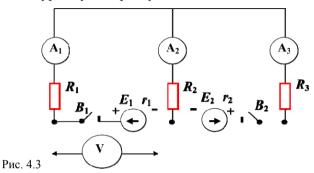
Применить к сложной электрической цепи закон Кирхгофа для определения токов в ветвях при заданных ЭДС и сопротивлениях пассивных элементов U, проверить результаты расчета на опыте.

Приборы и оборудование

- Амперметр ІА − 3 шт.
- 2. Вольтметр 60 В.
- 3. Резисторы $R_1 = 100 \text{ Om}$; $R_2 = 35 \text{ Om}$; $R_3 = 75 \text{ Om}$.
- 4. Соединительные провода.
- 5. Источники питания E_1 и E_2 .

Порядок проведения работы

1. Собрать электрическую схему рис. 4.3 и показать ее преподавателю или дежурному лаборанту.



- 2. Замкнуть выключатели B1 и B2. Записать показания приборов в табл. 4.1.
- 3. Рассчитать токи по законам Кирхгофа и результаты занести в табл. 4.1 и сравнить с опытными данными.

Таблица 4.1

Данные	I_1	I_2	I_3	
Из опыта				
Из расчета				

4. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

- 1. Достоинства метода расчета сложных электрических цепей законами Кирхгофа?
 - 2. Недостатки этого метода?
- 3. Какие другие величины (кроме токов) могут быть определены этим методом?

Литература

- 1. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электроники. М.: Высшая школа. 2001 .
- 2. Данилов И.А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. М.: Высшая школа, 2000.

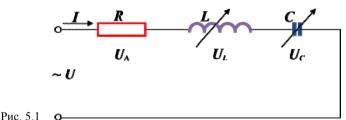
Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ

Цель работы: исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и емкости.

Теоретическая часть

В неразветвленной цепи с активным сопротивлением R, индуктивностью L и емкостью C (рис. 5.1) при условии, что индуктивное и емкостное сопротивления равны между собой ($X_L = X_C$), возникает особый режим работы, который называется резонансом напряжений.



Из условия резонанса напряжений ($X_L = X_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$) следует, что при заданных значениях индуктивности и емкости резонанс напряжений в цепи возникает при угловой частоте $\omega L = \frac{1}{\sqrt{IC}} \omega_{\rm p}$ или частоте $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_{\rm p}$, которые называют

резонансными и обозначают соответственно $\omega_{\rm p}$ и $f_{\rm p}$.

Резонансная частота f_p определяется исключительно параметрами цепи и поэтому называется частотой собственных колебаний цепи. Таким образом, в неразветвленной цепи с R, L и C резонанс напряжений возникает в случае, когда частота вынужденных колебаний (частота приложенного напряжения) оказывается равной частоте собственных колебаний цепи. Резонанс напряжений можно

получить путем изменения одной из трех величин L, C или f при постоянных двух других.

В простейшем случае резонанс напряжений может быть получен в электрической цепи переменного тока при последовательном включении катушки индуктивности и конденсаторов. При этом, изменяя индуктивность катушки при постоянных параметрах конденсатора, получают резонанс напряжений при неизменных значениях напряжения и емкости, частоты и активного сопротивления цепи. При изменении индуктивности L катушки происходит изменение реактивного индуктивного сопротивления. При этом полное сопротивление цепи также изменяется, следовательно, изменяются ток, коэффициент мощности, напряжения на катушке индуктивности, конденсаторах и активном сопротивлении катушки и активная, реактивная и полная мощности электрической цепи. Зависимости тока І, коэффициента мощности соѕф и полного сопротивления Z цепи переменного тока в функции индуктивного сопротивления (резонансные кривые) для рассматриваемой цепи приведены на рис. 5.2.

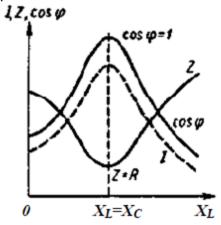


Рис. 5.2. Резонансные кривые

Резонанс напряжений характеризуется рядом существенных факторов.

1. При резонансе напряжений полное сопротивление электрической цепи переменного тока принимает минимальное значение и оказывается равным ее активному сопротивлению, т. е.

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

так как при этом $X_L = X_C$.

2. Из этого следует, что при неизменном напряжении питающей сети (U = const) при

резонансе напряжений ток в цепи достигает наибольшего значения
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)}} = \frac{U}{R} \; .$$

и совпадает по фазе с напряжением U, приложенным к зажимам цепи. Теоретически ток может достигать больших значений, определяемых напряжением сети и активным сопротивлением катушки. При малом значении активного сопротивления ток может достигать большого значения.

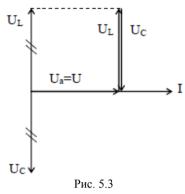
3. Коэффициент мощности цепи равен единице $\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{R} = 1$, т.е. принимает наибольшее значение, которому соответствует угол $\phi = 0$. Для полного использования генератора он должен работать при номинальном напряжении $U_{\rm H}$ с номинальным током $I_{\rm H}$ и $\cos \phi = 1$. В этом случае генератор развивает наибольшую активную мощность, равную его полной номинальной мощности: $P = U_{\rm H} I_{\rm H} \cos \phi = U_{\rm H} I_{\rm H} = S_{\rm H}$.

Уменьшение соѕф вызывает уменьшение активной мощности, т.е. неполное использование номинальной мощности генератора. В этом случае $I = \frac{P}{U_{_{\rm H}} \cos \phi}$. Следовательно, соѕф уменьшается, что

вызывает увеличение тока в цепи при постоянной активной мощности потребителя А это вызывает увеличение потери мощности на нагревание проводов, поэтому нужно стремиться повышать соѕф до значения, близкого к единице. Для этого параллельно активно-индуктивной нагрузке подключают конденсаторы.

- 4. Активная мощность при резонансе $P = RI^2$ имеет наибольшее значение, равное полной мощности S, в то же время реактивная мощность цепи $Q = XI^2 = (X_L X_C)I^2$ оказывается равной нулю: $Q = Q_L Q_C = 0$. При этом реактивная индуктивная и реактивная емкостная составляющие полной мощности $Q_L = Q_C = X_L I^2 = X_C I^2$ могут приобретать теоретически весьма большие значения, в зависимости от значений тока и реактивных сопротивлений.
- 5. При резонансе напряжений напряжения на емкости и индуктивности оказываются равными $U_L = U_C = IX_C = IX_L$ и в зависимости от тока и реактивных сопротивлений могут принимать большие значения, во много раз превышающие напряжение питающей сети. При этом напряжение на активном сопротивлении оказывается равным напряжению питающей сети, т. е. $U_R = U$.

Резонанс напряжений в промышленных электротехнических установках нежелательное и опасное явление, так как может привести к аварии вследствие недопустимого перегрева отдельных элементов электрической цепи или к пробою изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, изоляции кабелей и конденса-



торов при возможном перенапряжении на отдельных участках цепи. В то же время резонанс напряжений в электрических цепях переменного тока широко используется в радиотехнике и электронике в различного рода приборах и устройствах, основанных на резонансном явлении. Векторная диаграмма неразветвленной цепи с *R*, *L* и *C* при резонансе напряжений показана на рис. 5.3.

Если цепь не находится в резо-

нансе, то она может работать в индуктивном ($\phi > 0$) или емкостном ($\phi < 0$) режиме. На рис. 5.4 показаны векторные диаграммы неразветвленной цепи с R, L и C при преобладании индуктивной (a) и емкостной (a) нагрузки.

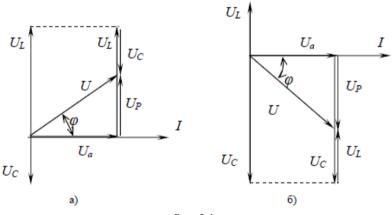


Рис. 5.4

При выполнении лабораторной работы напряжение на индуктивном сопротивлении катушки U_L рассчитывается по формуле

$$U_L = \sqrt{U_{\kappa}^2 - U_{\rm a}^2}$$

где U_{κ} – напряжение, измеренное на катушке.

Вычисления производятся по формулам:

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad Z = \frac{U}{I}, \quad U_p = |U_L - U_C|.$$

Задание

Знакомство с процессами, происходящими в простейших электрических цепях переменного тока, содержащих последовательное соединение активного и ёмкостного сопротивления. Измерение напряжений на отдельных участках цепи.

Приборы и оборудование

- 1. **Амперметр** 1**A**.
- 2. Вольтметр 250 В.
- 3. Ваттметр 150 Вт.
- 4. $Pезистор R_1(R)$.
- 5. Конденсатор $C = 10 \text{ мк}\Phi$.
- 6. Соединительные провода.
- 7. Автотрансформатор ЛАТР.

Порядок проведения работы

- 1. Собрать электрическую схему и показать её преподавателю или дежурному лаборанту.
- 2. Установить напряжение, чтобы ток в цепи был менее 1A (I < 1 A).
- 3. Показания приборов записать в табл. 5.1 для двух значений токов.
 - 4. Вычислить: R, X_C , C, Q, S, $\cos \frac{U_C}{I}$ и $\frac{U_C}{I}$.
- 5. Построить векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.
- 6. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

U	I	P	Z	R	X_c	U_a	U_c	S	Q	$\cos \frac{U_C}{I}$	$\frac{U_c}{I}$
В	Α	Вт	Ом	Ом	Ом	В	В	BA	BAP		град

Контрольные вопросы

- 1. В чем заключается явление резонанса напряжений и при каких условиях оно возникает?
- 2. Какую опасность представляет резонанс напряжений для электротехнических устройств?
- 3. Изменением, каких параметров электрической цепи можно получить резонанс напряжений?
 - 4. Как практически определить резонанс напряжений?
- 5. Запишите выражения для тока, полного сопротивления и коэффициента мощности электрической цепи при резонансе напряжений.
- 6. В чем состоят меры естественного повышения коэффициента мошности?

Контрольные тесты

Тест 1. Отношение активной мощности к полной называют коэффициентом мощности. Он показывает, какую долю всей вырабатываемой источником мощности составляет активная мощность. Коэффициент мощности обозначается...

1.
$$S^2 = P^2 + Q^2$$

2.
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

3.
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Тест 2. Коэффициент мощности генератора зависит от потребителя. Для более полного использования мощности генератора коэффициент мощности должен быть не менее...

1. 0,5

- 2. 0,92–0,93
- 3. 0.75
- 4. 0,3

Тест 3. Для повышения коэффициента мощности необходимо...

- 1. Увеличить нагрузку двигателя и поддерживать её близкой к номинальной.
- 2. Заменить слабо нагруженные двигатели двигателями меньшей мощности, чтобы они работали с нагрузкой, близкой к номинальной
- 3. Установить синхронный электродвигатель, который при достаточно большом возбуждении вызывает в цепи опережающий реактивный ток.
 - 4. Включить параллельно двигателю батарею конденсаторов.

Тест 4. В каких единицах измеряются напряжение, ток и сопротивления?

- 1. Bt, A, Om
- 2. B, A, OM
- 3. B·A, B, A

Тест 5. Какие напряжения Вы измеряли при выполнении лабораторной работы?

- 1. Полное напряжение
- 2. Индуктивное напряжение
- 3. Активное напряжение
- 4. Ёмкостное напряжение

Тест 10. Назовите формулу, по которой определяют полное сопротивление цепи в данной лабораторной работе.

1.
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

2.
$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_L^2}$$

3.
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_{L2})^2}$$

Литература

- 1. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электроники. М., Высшая школа, 2001.
- 2. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. М., Высшая школа, 2000.

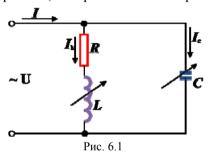
Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Цель работы: изучение резонанса токов.

Теоретическая часть

В разветвленной цепи, состоящей из двух ветвей, одна из которых имеет активное сопротивление R и индуктивность L, а другая емкость C при условии, что индуктивная и емкостная проводимости ветвей равны между собой ($B_L = B_C$) возникает особый режим работы, который называется резонансом токов.



Простейшей электрической цепью, в которой может наблюдаться резонанс токов, является цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора. На рис. 6.1 показана разветвленная цепь с R, L и C.

Полная проводимость расматриваемой цепи

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} \ .$$

Условие резонанса токов ($B_L = B_C$) можно записать через соответствующие параметры электрической цепи. Так как реактивная проводимость катушки определяется выражением

$$B_L = \frac{X_L}{Z_k^2} = \frac{\omega L}{R_k^2 + \omega^2 L^2},$$

а проводимость конденсатора без учета его активного сопротивления (RC=0)

$$B_C = \frac{X_C}{Z_c^2} = \frac{1}{X_C} = \omega C$$
,

то условие резонанса может быть записано в виде

$$\frac{\omega L}{R_{b}^{2} + \omega^{2} L^{2}} = \omega C.$$

Резонанс токов можно получить путем изменения одной из трех величин L, C или f при постоянных двух других. При некоторых условиях в подобных цепях резонанс может возникать и при одновременном изменении указанных параметров.

Простейшие резонансные цепи, состоящие из параллельно соединенных между собой катушки индуктивности и конденсатора, широко применяют в радиоэлектронике в качестве колебательных контуров, в которых резонанс токов достигается при некоторой определенной частоте сигнала, поступающего на вход соответствующего устройства.

В лабораторных условиях наиболее часто резонанс токов достигается при неизменной емкости C конденсатора, путем изменения индуктивности L катушки. С изменением индуктивной проводимости $B_C = \omega C$, пропорциональной емкости конденсатора, происходит изменение полной проводимости Y, общего тока I и коэффициента мощности $\cos \varphi$.

Указанные зависимости называются резонансными кривыми, пример которых показан на рис. 6.2.

Резонанс токов характеризуется следующими явлениями:

1. В состоянии резонанса токов полная проводимость цепи равна активной проводимости

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G$$

и является наименьшей.

2. Минимальное значение проводимости обусловливает и минимальное значение тока цепи: I = YU = GU.

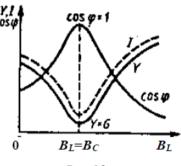


Рис. 6.2

3. Индуктивная и емкостная составляющая токов в ветвях цепи равны между собой: $I_L = UB_L = UB_C = I_C$.

Ток в неразветвленной части цепи при этом имеет наименьшее значение и является чисто активным, т.е. совпадает по фазе с напряжением U, приложенным к зажимам цепи: $I=UY=UG=I_{\rm a}$.

При этом реактивные составляющие тока I_L и I_C (в зависимости от значения реактивных проводимостей) могут приобретать теоре-

тически весьма большие значения и намного превышать ток І, потребляемый электрической цепью из сети.

Реактивная составляющая полной мощности, потребляемой цепью, при $B_L = B_C$ оказывается равной нулю: $Q = B_L U^2 - B_C U^2 =$ $= Q_L - Q_C = 0.$

При этом индуктивная и емкостная составляющие реактивной мощности также могут приобретать весьма большие значения, оставаясь равными друг другу.

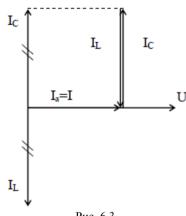


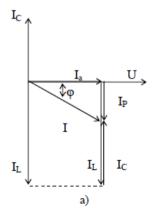
Рис. 6.3

разветвленной цепи с R, L и Cи емкостной (δ) нагрузки.

- 5 Полная мошность цепи при резонансе равна ее активной составляющей: $S = YU^2 = GU^2 = P$.
- Коэффициент мощности цепи: $\cos \varphi = \frac{G}{V} = \frac{Y}{V} - 1$, а $\varphi = 0$.

Векторная диаграмма разветвленной цепи с R, L и C при резонансе токов показана на рис. 6.3

Если цепь не находится в резонансе, то она может работать в индуктивном (ф>0) или емкостном (ϕ <0) режиме. На рис. 6.4 показаны Векторные диаграммы при преобладании индуктивной (а)



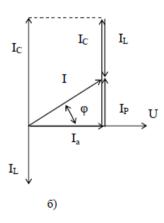


Рис. 6.4

При выполнении лабораторной работы I_L рассчитывается по формуле $I_L = \sqrt{I_{\rm k}^2 - I_{\rm a}^2}$, где $I_{\rm k}$ – ток катушки; $I_{\rm a} = \frac{P}{U}$; $I_{\rm p} = |I_L - I_C|$.

Задания

- 1. Изменением ёмкости добиться резонанса токов в разветвлённой цепи переменного тока.
 - 2. Уяснить особенности работы цепи при резонансе токов.
- 3. Получить практические навыки построения векторной диаграммы в разветвлённой цепи переменного тока.

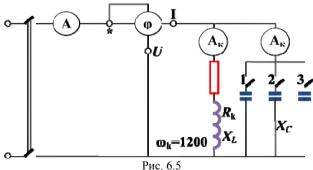
Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами необходимыми для выполнения работы и записать их основные технические характеристики в табл. 6.1.

Таблица 6.1

No	Наименова-	Система	Номер	Класс	Предел	Цена
Π/Π	ние прибора	прибора	прибора	точности	измерения	деления
1	амперметр					
2	амперметр					
3	амперметр					
4	фазометр					

2. Собрать электрическую схему (рис. 6.5) и показать её преподавателю.



3. Установить ёмкость батареи конденсаторов $C_1 = 16$ мкФ при напряжении сети U = 150 В. Показания приборов записать в табл. 6.2

Таблина 6.2

No			Из	мереі	HO				Bı	ычисл	ено			
n/	$\boldsymbol{\mathit{U}}$	I	I_K	Ic	φ	Cos q	Cos \varphi_K	R_K	X_L	Z_K	X_{C}	I_A	I_L	I_P
n	В	A	A	A	град			Ом	Ом	Ом	Ом	A	A	A
1		_	_				0,25							
2		-					0,25						_	
3							0,25							

- 4. Установить ёмкость батареи конденсаторов $C_2 = 32$ мкФ и изменением индуктивности катушки (изменить положение сердечника) добиться сдвига фаз на фазометре $\varphi = 0$. Это случай резонанса токов.
- 5. Установить ёмкость батареи конденсаторов $C_3 = 58$ мкФ. Показание приборов записать в табл. 6.2.
- 6. По результатам измерений, пользуясь приведёнными формулами, произвести вычисления.

$$X_L = \frac{U}{I_L}$$
 – индуктивное сопротивление;

$$X_{C} = \frac{U}{I_{C}}$$
 - ёмкостное сопротивление;

$$Z_{\scriptscriptstyle k} = \frac{U}{I_{\scriptscriptstyle k}}$$
 – полное сопротивление катушки;

 $R_k = Z_k \cos \varphi_k -$ активное сопротивление катушки;

$$X_L = \sqrt{Z_k^2(-R_k^2)}$$
 — индуктивное сопротивление катушки;

 $I_a = I_k \cos \varphi_k$ – активная составляющая тока в катушке;

$$I_{L} = \sqrt{I_{k}^{2} (-I_{\mathrm{a}}^{2})} \, -$$
индуктивная составляющая тока в катушке

 $I_{\rm p} = I_L I_C$ – реактивная составляющая тока в катушке.

7. Построить в масштабе векторные диаграммы для всех трёх опытов.

8. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

- 1. Что называется резонансом токов и в каких цепях он возни-кает?
 - 2. Каким путём можно добиться резонанса токов?
- 3. Почему при резонансе токов ток в неразветвлённой цепи минимальный?
- 4. Чему равны активная и реактивная мощности при резонансе токов?

Контрольные тесты

- Тест 1. В разветвлённой цепи с двумя ветвями, одна из которых обладает индуктивностью L, а другая ёмкостью C, при равенстве сопротивлений ветвей $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ наступает...
 - 1. резонанс напряжений.
 - 2. нагрузочный режим.
 - 3. резонанс токов.

Тест 2. Каким путём можно добиться резонанса токов?

- 1. Изменением ёмкости.
- 2. Изменением индуктивности.
- 3. Изменением частоты.
- 4. Всеми выше перечисленными способами.

Тест 3. Чему равен угол сдвига фаз при резонансе токов в неразветвлённой части цепи?

- 1. $\varphi = 0^{\circ}$
- 2. $\phi = 90^{\circ}$
- 3. $\varphi = 73^{\circ}$

Тест 4. Чему равен ток при резонансе токов в неразветвлённой части цепи?

- 1. Наибольший.
- 2. Номинальный.
- 3 Наименьший

- Тест 5. Изменится ли условие резонанса токов при увеличении активного сопротивления цепи?
 - 1. Да. 2. Нет.
- Тест 6. В течение первой четверти периода напряжение на конденсаторе от нуля увеличивается до максимума и в электрическом

поле запасается энергия $W = \frac{CU^2}{2}$. В течение следующей четверти

периода напряжение на конденсаторе уменьшается до нуля, происходит уменьшение электрического поля. Ток в катушке в течение первой половине периода от максимального значения уменьшается до нуля, происходит уменьшение магнитного поля. В течение следующей четверти периода тока в катушке увеличивается до максимального и энергия магнитного поля катушки увеличивается до

максимума $W = \frac{LI^2}{2}$, то есть энергия электрического поля перехо-

дит в энергию магнитного поля и наоборот. Цепь, в которой происходит обмен энергиями, называется...

- 1. колебательным контуром.
- 2. электрической цепью.
- 3. конденсатором.

Тест 7. Назовите формулу реактивной мощности.

- 1. $Q = I\omega L$
- 2. $\tilde{Q} = I^2 U$
- 3. $\tilde{Q} = I^2 X L$

Тест 8. Чему равна активная мощность при резонансе токов?

- 1. Полной мощности.
- 2. Реактивной мощности.
- 3. Мгновенной мощности.

Тест 9. Назовите формулу полной мощности.

- 1. $P = IU\cos\varphi$
- $2. \quad S = IU = I^2Z$
- 3. $Q = IU\sin\varphi$

Тест 10. Назовите единицу измерения полной мощности.

- 1. B·A.
- 2. Вт.
- 3. BAP

Тест 11. Назовите формулу индуктивного сопротивления.

1.
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- 2. $X_L = \omega L$
- 3. $P = I^2 R$

Тест 12. Назовите формулу коэффициента мощности

1.
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- 2. $\cos \varphi = P/C$
- 3. $S^2 = P^2 + Q^2$

Тест 13. Сопротивление, которое характеризуется влиянием ЭДС самоиндукции на величину тока в цепи, называется...

- индуктивным.
- активным.
- 3. полным.
- ёмкостным.

Тест 14. Можно ли с помощью амперметра зафиксировать режим резонанса токов в цепи?

- 1. Да.
- 2. Нет.

Тест 15. Выберите комплекс признаков, соответствующих резонансу токов.

- 1. Ток источника минимален, ток в контуре велик, сопротивление контура чисто активное
- 2. Ток источника максимален, напряжение на катушке несколько больше напряжения на конденсаторе, сопротивление контура чисто активное.
- 3. Ток источника большой, напряжение на катушке равно напряжению на конденсаторе, сопротивление контура мало.
- 4. Ток источника большой, напряжение на катушке несколько больше напряжения на конденсаторе, сопротивление контура мало.

Литература

- 1. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электроники. М.: Высшая школа, 2001.
- 2. Данилов И.А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. М.: Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

Цель работы: экспериментальное подтверждение основных теоретических соотношений при трёхфазной нагрузке, соединённой по схеме «звезда».

Теоретическая часть

В современных условиях электрическая энергия вырабатывается преимущественно источниками энергии с трехфазной системой напряжений. Такие источники широко применяют в технике. Объясняется это тем, что трехфазная система переменного тока является наиболее экономичной. В качестве трехфазных источников напряжений на электрических станциях используют трехфазные синхронные генераторы, на статоре которых размещаются три фазные обмотки (фазы), смещенные в пространстве относительно друг друга на угол 120°.

Трехфазной цепью называется совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол 120°. Отдельные электрические цепи, образующие трехфазную цепь, называются фазами. Фазами также называют обмотки синхронных генераторов, питающие провода и приемники трехфазной цепи. Фазы обозначают буквами *А, В, С*.

Каждая фаза генератора или приемника имеет начало и конец, т.е. два вывода. Начала фаз обычно обозначают буквами A, B, C, а концы — буквами X, Y, Z.

В трехфазной цепи обмотки генератора и фазы приемников соединяются звездой или треугольником.

Фазы обмотки генератора (трансформатора) и провода соединительной сети обычно одинаковы. Фазы приемника по характеру нагрузки и потребляемой мощности могут быть как одинаковыми, так и не одинаковыми.

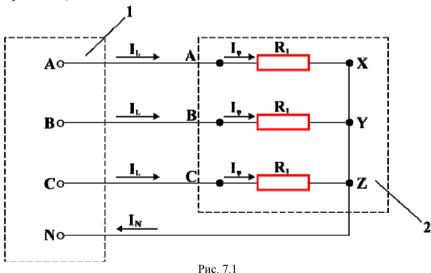
Если фазы приемника совершенно одинаковы, то такой приемник представляет собой равномерную нагрузку для генератора, так

как в этом случае по фазам генератора протекают равные по величине токи.

Если фазы приемника не одинаковы, то такой приемник представляет собой неравномерную нагрузку. Неравномерную нагрузку создают обычно осветительные системы, так как в фазах такой системы работает одновременно разное число ламп.

При соединении фаз приемника звездой концы фаз (X, Y, Z) соединяются в общую точку, которую называют нулевой или нейтральной точкой N (иногда просто нейтралью), а к началам фаз (A, B, C) присоединяют линейные провода, идущие от источника.

В лабораторной работе источником является щиток лабораторного стола. Нулевая точка приемника соединяется с нулевой точкой источника посредством нулевого провода. На рис. 7.1. показана схема соединения приемника звездой (I – лабораторный щиток, 2 – приемник).



При соединении звездой различают линейные и фазные напряжения, линейные и фазные токи.

Напряжение между началом и концом любой из фаз или между любым линейным и нулевым проводом называется фазным напряжением. Оно обозначается U_{4} , U_{B} , U_{C} или U_{φ} .

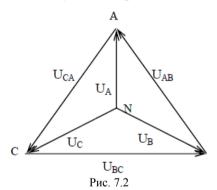
Напряжение между началами двух фаз или между любыми двумя линейными проводами называется линейным напряжением. Оно обозначается U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} или U_{π} . По абсолютной величине линейные напряжения в 3 раз больше фазных: $U_{\pi} = 3U_{\Phi}$.

Токи, протекающие в фазах приемника, называются ϕ азными токами. Они обозначаются I_{ϕ} . Токи в линейных проводах называются линейными токами. Они обозначаются I_A , I_B , I_C или I_{π} .

Из рис. 7.1. видно, что $I_{\pi} = I_{\phi} = I$.

При соединении приемника звездой с нулевым проводом (см. рис. 7.1) фазы работают независимо друг от друга. В этом случае по нулевому проводу протекает ток, действующее значение которого равно геометрической сумме действующих значений токов в фазах: $I_N = I_A + I_B + I_C$.

При равномерной нагрузке эта сумма токов равна нулю, следовательно, ток в нулевом проводе протекать не будет и нулевой провод не нужен. На рис. 7.2 показана векторная диаграмма напряже-



ний и токов при соединении звездой и равномерной активной нагрузке.

В случае несимметрии нагрузки трехфазной трехпроводной цепи (при отсутствии нулевого провода) между нейтральными точками генератора и приемников возникает узловое напряжение или иначе — происходит смещение нейтрали приемников. Изза смещения нейтрали нарушает-

ся симметрия фазных напряжений на приемнике, что приводит к его ненормальной работе.

Чтобы восстановить равенство фазных напряжений на приемниках при несимметричной нагрузке, в трехпроводную цепь добавляется нулевой провод, благодаря которому потенциал нулевой точки приемников становится равным потенциалу нулевой точки источника.

В этом случае при любой несимметрии нагрузки смещения нейтрали не происходит, и система фазных напряжений будет симметричной.

При несимметричной нагрузке обрыв нулевого провода вызывает значительное изменение фазных напряжений и токов у потребителя, что в большинстве случаев не допустимо. Поэтому в нулевой провод предохранители не устанавливаются.

Предельными случаями несимметрии нагрузки является обрыв проводов или короткое замыкание одной из фаз трехфазной цепи.

При обрыве одной из фаз трехпроводной цепи, например фазы А, две другие фазы оказываются включенными последовательно на линейное напряжение *UBC*. При одинаковом сопротивлении этих фаз на каждую из них придется половина линейного напряжения. Напряжения на оборванной фазе не будет:

Задание

Исследовать трехфазную цепь при соединении приемников энергии по схеме «звезда».

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы. Собрать электрическую схему (рис. 7.3) и показать её преподавателю.

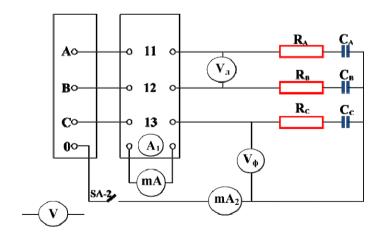


Рис. 7.3

- 2. Измерить токи, линейные и фазные напряжения в трёхфазной цепи при равномерной и симметричной нагрузке в фазах, т.е. $Z_A = Z_B = Z_C$ и $\cos \varphi_A = \cos \varphi_B = \cos \varphi_C$; $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 74^\circ$; $R_A = R_B = R_C = 220$ Ом $C_A = C_B = C_C = 4$ мк Φ :
 - а) с нулевым проводом (выключатель SA-2 замкнут);
 - б) без нулевого провода (выключатель SA-2 разомкнут);

Uзмерение фазных токов осуществляется прибором mA_1 путем переключения его на измерение фазных токов при различных положениях переключателя «контроль 1»:

 $n11 \Rightarrow I_{11} \Rightarrow$ измеряется I_A ,

 $n12 \Rightarrow I_{12} \Rightarrow$ измеряется I_B ,

 $n13 \Rightarrow I_{13} \Rightarrow$ измеряется I_C .

Прибором mA_2 измеряют ток нулевой I_0 .

Измерение линейных напряжений. Линейные напряжения измеряют вольтметром между линейными проводами на концах резисторов U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Напряжение измеряется мультимером $\sim U$ шкала 700 В.

Измерение фазных напряжений. Фазные напряжения измеряются вольтметром между линейным проводом на концах резисторов и нулевым проводом на общей точке конденсаторов U_4 , U_B , U_C .

Таблица 7.1

	Характер нагрузки	измерено								вычислено						
Nº n/n		SA-2	линейные		фазные											
			U_{AB}	U BC	UAC	UA	U_B	U_c	IA	IB	Ic	Ι ο	P_A	P_B	P _C	Р общ.
			В	В	В	В	В	В	mA	mA	mA	mA	Вт	Вт	Вт	Вт
1	$R_A = R_B = R_C$ = 220 O.M	Вкл														
2	$C_A = C_B = C_C = 4 \text{ MK} \phi$	вык										-				
3	$R_A = R_B = R_C$ $= 220 O_M$	Вкл														
4	$C_A = 8$ мкф $C_B = 4$ мкф $C_C = 2$ мкф	вык										-				
5	$R_A = R_B = R_C$ $= 220 \text{ OM}$ $C_A = C_A = 0$	Вкл														
6		вык										_				

2. Установить неравномерную нагрузку во всех фазах $R_A = R_B = R_C = 220$ Ом, $C_A = 8$ мкф, $C_B = 4$ мкФ, $C_C = 2$ мкФ; $\cos \varphi_A = 0.44$; $\cos \varphi_B = 0.27$; $\cos \varphi_C = 0.14$; $\varphi_A = 64^\circ$; $\varphi_B = 74^\circ$; $\varphi_C = 82^\circ$.

Показания приборов записать в табл. 7.1.

Исследовать трёхфазную цепь при отсутствии нагрузки в фазе C. $R_A = R_B = R_C = 220$ Ом, $C_A = 8$ мкФ, $C_B = 8$ мкФ, $C_C = \infty$ (конденсатор в фазе C выключить); $\cos \varphi_A = 0,44$; $\cos \varphi_B = 0,44$; $\varphi_A = 64^\circ$; $\varphi_B = 64^\circ$

Показания приборов записать в табл. 7.1.

- 3. По результатам измерений вычислить активную мощность трёхфазной цепи $P=P_A+P_B+P_C=I_AU_A\cos\varphi_A+I_BU_B\cos\varphi_B+I_CU_C\cos\varphi_C$.
 - 4. Построить векторные диаграммы для 1 и 3 опытов.
- 5. Написать отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

- 1. Как измерить линейные и фазные напряжения?
- 2. Как определить нулевой ток на векторной диаграмме?
- 3. Каково назначение нулевого провода?
- 4. Почему при равномерной нагрузке фаз и при наличии нулевого провода, ток в нулевом проводе равен нулю?

Контрольные тесты

- Тест 1. Сколько проводов используется в связанной трёхфазной системе?
 - 1. 6 проводов.
 - 2. 2 провода.
 - 3. 3 или 4 провода.

Тест № 2. Как измерить линейное напряжение?

- 1. Напряжение на концах нагрузки.
- 2. Напряжение между линейными проводами.
- 3. Напряжение между линейным и нулевым проводом.

Тест 3. Как измерить фазное напряжение?

- 1. Напряжение между началами обмоток генератора.
- 2. Напряжение между линейными проводами.
- 3. Напряжение между линейным и нулевым проводом.

Тест 4. Назначение нулевого провода.

- 1. Для выравнивания линейных напряжений.
- 2. Для симметрии фазных напряжений.
- 3. Для симметрии нагрузки.

Тест 5. Как определить нулевой ток?

- 1. Как алгебраическая сумма трёх фазных токов.
- 2. Как векторная сумма трёх фазных токов.
- 3. Как векторная сумма двух фазных токов.

Тест 6. Какие способы соединения нагрузки возможны в трёхфазной системе переменного тока?

- 1. Параллельно.
- Звезлой.
- 3. Треугольником.

Тест 7. Какая нагрузка в трёхфазной системе называется симметричной, где Z_a , Z_b , Z_c сопротивление нагрузки, а φ_a , φ_b , φ_c угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке.

- 1. $Z_a = Z_b = Z_c$ $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$
- 2. $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ 3. $Z_a = Z_b = Z_c$ $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$
- 4. $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$

Тест 8. Какие соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в трёхфазной цепи, соединённой звездой?

- 1. $U_{\pi} = \sqrt{3} U_{\phi}; I_{\pi} = I_{\phi}$
- 2. $U_{\pi} = U_{\phi}$; $I_{\pi} = \sqrt{3} I_{\phi}$
- 3. $U_{\pi} = \sqrt{3} U_{\Phi}$ $I_{\pi} = \sqrt{3} I_{\Phi}$

Тест 9. Какую формулу можно использовать для подсчёта активной мощности в симметричной трёхфазной цепи?

- 1. $S = \sqrt{3} U_{\pi} I_{\pi}$
- 2. $Q = \sqrt{3} U_{\pi} I_{\pi} \sin \varphi$
- 3. $P = \sqrt{3} U_{\pi} I_{\pi} \cos \theta$

Тест 10. Линейное напряжение 380 В. Определить фазное напряжение, если симметричная нагрузка соединена звездой.

- 1. 380 B
- 2. 220 B
- 3. 127 B

- Тест 11. Как соединены обмотки генератора, если концы этих обмоток объединяют в общую точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают 0. К началам обмоток подключают линейные провода?
 - 1. Треугольником.
 - Мостом.
 - 3. Звездой.

Тест 12. Будут ли меняться линейные токи при обрыве нулевого провода в случае:

а) симметричной нагрузки

б) несимметричной нагрузки

1. Да, нет.

5. Да, нет.

2. Да, да.

6. Да, да.

3. Нет, да.

7. Нет, да.

4. Нет, нет.

8. Нет, нет.

Тест 13. Как измерить фазный ток?

- 1. Измерить ток в нулевом проводе.
- 2. Измерить ток в линейном проводе.
- 3. Измерить ток в нагрузке.
- 4. Измерить ток в обмотке генераторе.

Тест 14. Какая трёхфазная система токов называется симметричной?

- 1. Если ЭДС синусоидальны, их частоты одинаковы и ЭДС каждой фазы смещены относительно друг друга на угол 120°.
- 2. Если ЭДС синусоидальны, их частоты одинаковы и ЭДС каждой фазы смещены относительно друг друга на угол 90 $^{\circ}$.
- 3. Если ЭДС синусоидальны, их частоты и амплитуды одинаковы и ЭДС каждой фазы смещены относительно друг друга на угол 120° .

Литература

- 1. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электроники» М., Высшая школа, 2001.
- 2. Данилов И.А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники М., Высшая школа, 2000.

Вариант I. Виртуальное схемотехническое моделирование в системе Electronics Workbench

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы: изучение принципа действия и основных характеристик полупроводникового диода.

Введение в систему виртуального схемотехнического моделирования Electronics Workbench

Система виртуального схемотехнического моделирования Electronics Workbench предназначена для моделирования и анализа электрических схем. Работа в реальной лаборатории требует больших временных затрат на подготовку эксперимента. Electronics Workbench — электронная лаборатория — позволяет сделать изучение электрических схем более доступным. Ошибки экспериментатора в реальной лаборатории могут привести к большим материальным потерям, в то время как, работая в ElectronIcs Workbench, студент застрахован от случайного поражения током, а приборы не выйдут из строя из-за неправильно собранной схемы. Кроме того, быстрее выявляются ошибки, а студент имеет больше возможностей для проявления творческого подхода.

Программа Electronics Workbench использует стандартный интерфейс Windows, что значительно облегчает её использование. На рис. 8.1 показаны основные элементы, используемые для моделирования и анализа электрических схем.

Моделирование схем осуществляется путём выбора необходимых элементов из библиотеки компонентов и перемещением их с помощью «мыши» на рабочее поле. Двойным щелчком левой кнопки «мыши» на элементе можно открыть диалоговое окно, в

котором указаны параметры этого элемента. Вращение элементов на рабочем поле осуществляется нажатием комбинацией клавиш <Ctrl>+<R>. Соединяя выводы элементов между собой, получаем электрическую схему.

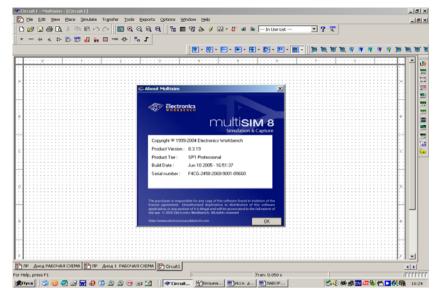


Рис. 8.1

Для изменения значения элемента необходимо выделить его и дважды нажать левую кнопку «мыши». Для ввода условного обозначения элемента необходимо, выделив элемент, нажать клавиши <Ctrl>+<L>. На рис. 8.2 показана панель активных компонентов.

Теоретическая часть

Полупроводниковый диод представляет собой монокристалл, в котором созданы области различной проводимости: дырочной (p-типа) и электронной (n-типа). Граница между этими областями называется p-n-переходом (рис. 8.3, a). Если к кристаллу приложить напряжение так, чтобы к p-области был приложен отрицательный потенциал, а к n-области — положительный, то носители, притягиваясь к разноименным полюсам, создадут около p-n-перехода область, лишенную носителей.

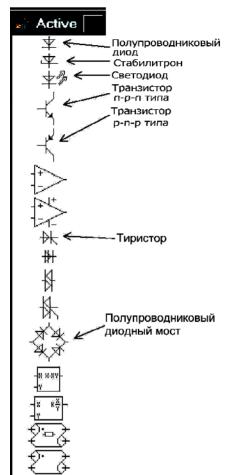


Рис 82

Эта область как бы разрывает цепь, и ток в этой цепи отсутствует. Такая полярность напряжения называется запирающей или обратной и соответствует закрытому состоянию диода (рис. 8.3, δ).

Противоположная полярность напряжения перемещает носители навстречу друг другу, и происходит переход (инжекция) носителей в «чужую» область. В результате во внешней цепи появляется ток. Такая полярность напряжения называется прямой или отпирающей и соответствует открытому диоду (рис. 8.3, 6).

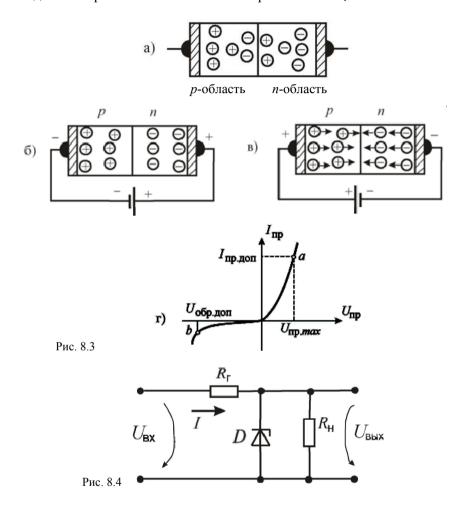
Типичная вольтамперная характеристика полупроводникового диода изображена на рис. $8.3, \varepsilon$). Здесь ветвь 0a соответствует проводящему (прямому) направлению, а ветвь 0b — непроводящему (обратному).

В прямом направлении диод характеризуют допустимым током $I_{\text{пр,доп}}$ и соответствующим ему падением напряжения на

диоде $U_{\rm np\ max}$. В обратном направлении диод характеризуют допустимым значением напряжения $U_{\rm oбp\ max}$, которое может быть приложено к диоду.

Наличие у диода критического обратного напряжения, при котором наступает электрический (не тепловой) пробой, позволяет использовать полупроводниковый диод в схемах стабилизации напряжения. Одна из возможных схем стабилизации представлена на рис. 8.4. Выходное напряжение схемы с большой точностью поддерживается на заданном уровне $U_{\text{вых}}$ = const, равном критическому

(пробивному) напряжению диода. Разница между входным и выходным напряжениями гасится на сопротивлении $R_{\rm r}$.



Если входное напряжение возрастает, то увеличивается и обратный ток диода, возрастает ток I и падение напряжения на гасящем сопротивлении $R_{\rm r}$.

Приращения напряжений $U_{\rm BX}$ и $AI\text{-}R_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ взаимно компенсируются, а $U_{\scriptscriptstyle \rm BbIX}$ сохраняется на заданном уровне.

Диод, используемый для стабилизации напряжения, называется стабилитроном. Недостаток данной схемы — зависимость пробивного напряжения стабилитрона, а следовательно, и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от температуры. Эту зависимость можно существенно уменьшить, включив последовательно со стабилитроном компенсирующий диод в прямом направлении.

Залания

- 1. Знакомство с системой виртуального схемотехнического моделирования ElectronIcs Workbench.
 - 2. Исследование свойств диода.

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- 2. Монитор.
- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

1. Снятие BAX диода. Откройте файл «Диод_1.ms8» (рис. 8.5). Для снятия прямой ветви BAX переключатель установите в правое положение (Key A).

Включите схему. Последовательно устанавливая значение ЭДС источника от 6 до 0 В, запишите значения напряжения $U_{\rm np}$ и тока $I_{\rm np}$ диода в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Прямая ветвь ВАХ диода						
E, B	$U_{\mathrm{пр}}$, м B	$I_{\rm np}$, MA				

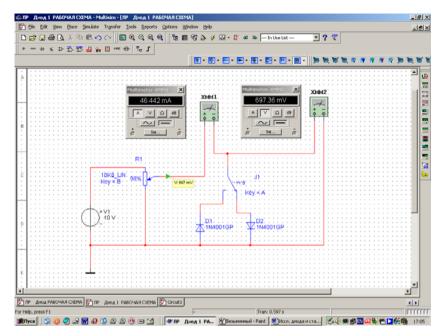


Рис. 8.5

Для снятия обратной ветви ВАХ переключатель установите в левое положение. Последовательно устанавливая значение ЭДС источника от 0 до 20 В, запишите значения напряжения Uоб и тока Iоб диода в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Обратная ветвь ВАХ диода						
E, B	$U_{ m of}$, м ${ m B}$	$I_{\text{об}}$, мА				

По полученным данным постройте графики $I_{\rm np}=f(U_{\rm np})$ и $I_{\rm ob}=f(U_{\rm ob}).$

1. Исследование выпрямительных свойств диода на экране осциллографа. Откройте файл «Диод 2.ms8» (рис. 8.6).

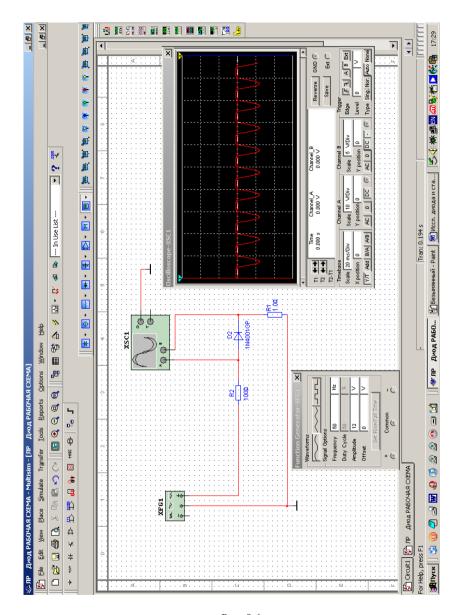


Рис. 8.6

Включите схему. Начертите полученную осциллограмму.

1. Напишите отчет по форме, указанной в методических рекомендациях (см. с. 9).

Контрольные вопросы

- 1. Сравните напряжения на диоде при прямом и обратном смещении по порядку величин. Почему они различны?
- 2. Чему равны сопротивления идеального диода в прямом и обратном направлениях?
- 3. Сравните токи через диод при прямом и обратном смещении по порядку величин. Почему они различны?
 - 4. Чем ограничивается наибольший прямой ток через диод?
 - 5. Назовите электроды диода.

Литература

- 1. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере. М.: Горячая линия Телеком, 2003.
- 2. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на $\emph{I}BM$ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 3. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Elect*R*on*I*cs Wo*R*kbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2: Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 4. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 6. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия Телеком, 2007.

Лабораторная работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТАБИЛИТРОНА

Цель работы: исследование характеристик работы полупроводникового стабилитрона.

Теоретическая часть

Стабилитроны — это полупроводниковые диоды, работающие в режиме лавинного пробоя. При обратном смещении полупроводникового диода возникает электрический лавинный пробой *p-п*-перехода. При этом в широком диапазоне изменения тока через диод напряжение на нем меняется очень незначительно. Для ограничения тока через стабилитрон последовательно с ним включают сопротивление. Если в режиме пробоя мощность, расходуемая в нем, не превышает предельно допустимую, то в таком режиме стабилитрон может работать неограниченно долго. На рис. 9.1, *а* показано схематическое изображение стабилитронов, а на рис. 9.1, *б* приведены их ВАХ.

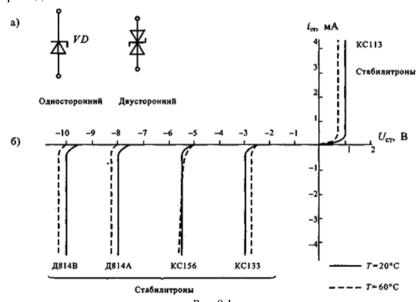
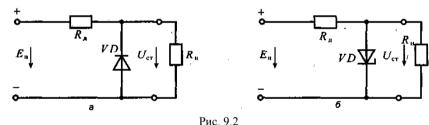


Рис. 9.1

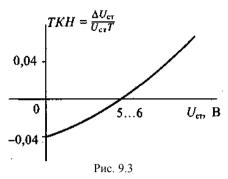
Напряжение стабилизации стабилитронов зависит от температуры. На рис. 9.1, σ штриховой линией показано перемещение BAX при увеличении температуры. Очевидно, что повышение температуры увеличивает напряжение лавинного пробоя при $U_{\rm cr} > 5$ В и уменьшает его при $U_{\rm cr} < 5$ В. Иначе говоря, стабилитроны с напряжением стабилизации больше 5 В имеют положительный температурный коэффициент напряжения (ТКН), а при $U_{\rm cr} < 5$ В – отрицательный. При $U_{\rm cr} = 6...5$ В ТКН близок к нулю.

Иногда для стабилизации напряжения используют прямое падение напряжение на диоде. Такие приборы в отличие от стабилитронов называют *стабисторами*. В области прямого смещения *p-n*-перехода напряжение на нем имеет значение 0,7...2 В и мало зависит от тока. В связи с этим стабисторы позволяют стабилизировать только малые напряжения (не более 2 В). Для ограничения тока через стабистор последовательно с ним также включают сопротивление. В отличие от стабилитронов при увеличении температуры напряжение на стабисторе уменьшается, так как прямое напряжение на Диоде имеет отрицательный ТКН. Схема включения стабилитрона приведена на рис. 9.2, a, а стабистора — на рис. 9.2, b.



Приведенный выше характер температурной зависимости напряжения стабилитронов обусловлен различным видом пробоя в них. В широких переходах при напряженности поля в них до $5\cdot 10^4$ В/см имеет место лавинный пробой. Такой пробой при напряжении на переходе >6 В имеет положительный температурный коэффициент.

В узких переходах при большой напряженности электрического поля (более $1,4\cdot10^6$ B/см) наблюдается пробой, который называется **зенеровским.** Такой пробой имеет место при низком напряжении на переходе (менее 5 B) и характеризуется отрицательным темпе-



ратурным коэффициентом. При напряжении на переходе от 5 до 6 В одновременно существуют оба вида пробоя, поэтому температурный коэффициент близок к нулю. График зависимости температурного коэффициента ТКН_{ст} от напряжения стабилизации рис. 9.3.

Основными параметрами стабилитронов являются:

- напряжение стабилизации $U_{\rm cr}$;
- ullet температурный коэффициент напряжения стабилизации ТКН $_{\rm cr}$:
 - допустимый ток через стабилитрон;
 - дифференциальное сопротивление стабилитрона $RU_{\rm cr}$.

Кроме того, для импульсных стабилитронов нормируется время включения стабилитрона $t_{\text{вкл}}$, а для двухсторонних стабилитронов нормируется несимметричность напряжений стабилизации.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона — это параметр, который характеризует наклон ВАХ в области пробоя. На рис. 9.4, a приведена линеаризованная характеристика стабилитрона, с помощью которой можно определить его дифференциальное сопротивление и построить схему замещения, приведенную на рис. 9.4, δ .

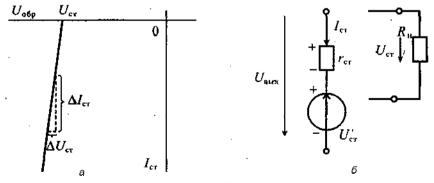


Рис. 9.4

Используя приведенную на рис. 9.4. δ схему замещения, можно рассчитать простейший стабилизатор напряжения, изображенный на рис. 9.5, а. Заменяя стабилитрон его схемой замещения, получим расчетную схему, изображенную на рис. 9.5, б.

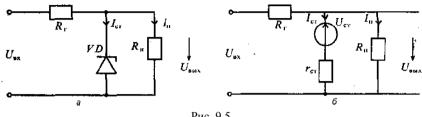


Рис. 9.5

Условное обозначение стабилитрона включает: материал полупроводника (К – кремний); обозначение подкласса стабилитронов (букву С); цифру, указывающую на мощность стабилитрона; две цифры, соответствующие напряжению стабилизации, и букву, указывающую особенность конструкции или корпуса. Например, стабилитрон КС 168А соответствует маломощному стабилитрону (ток менее 0,3 А) с напряжением стабилизации 6,8 В, в металлическом корпусе.

Кроме стабилизации напряжения, стабилитроны также используются для ограничения импульсов напряжения и в схемах защиты различных элементов от повышения напряжения на них.

Залание

Экспериментально исследовать зависимости тока стабилитрона от напряжения.

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- Монитор.
- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

- 1. Приступая к выполнению данной лабораторной работы, необходимо запустить программу **ELECTRONICS WORKBENCH**. После запуска она будет выглядеть, как показано на рис. 9.6.
- 2. Для работы необходимо загрузить схему исследования. **<Стабилитрон.ms8>** и нажать кнопку « **Открыть»**. Появится схема, показанная на рис. 9.7.
- 3. Для схемы включения стабилитрона, обеспечивающей получение прямой ветви ВАХ, необходимо изменить включение стабилитрона.
 - 4. Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать



5. Изменяя напряжение источника питания переменным резистором +(Sh/ft+A); -(A) (или изменяя значение напряжения питания), снять зависимость тока стабилитрона ($I_{\rm cr}$) от напряжения стабилитрона ($U_{\rm cr}$) (прямая ветвь). Данные занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Прямая ветвь					
$N_{\underline{0}}$	$U_{ m cr}$, В	$I_{ m cr}$, м ${ m A}$			
1					
2					
3					
4					
5					

- 6. Изменить полярность напряжения питания схемы или включить стабилитрон в обратном направлении. Снять зависимость тока стабилитрона ($I_{\rm cr}$) от напряжения стабилитрона ($U_{\rm cr}$) (обратная ветвь). Данные занести в табл. 9.2.
- 7. По данным измерения построить графики прямой и обратной ветви ВАХ стабилитрона.
 - 8. Написать отчет о работе по требуемой форме (см. с. 9).

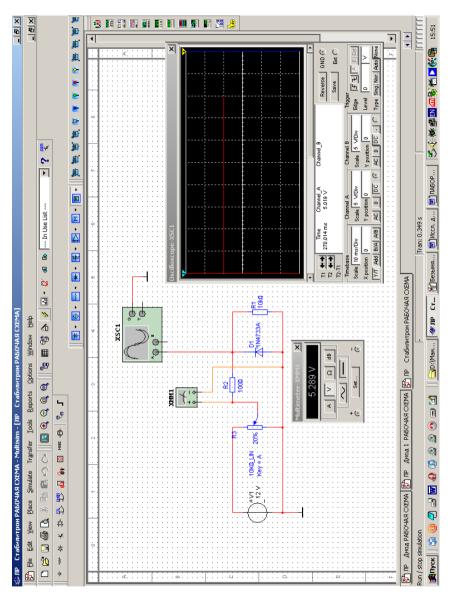
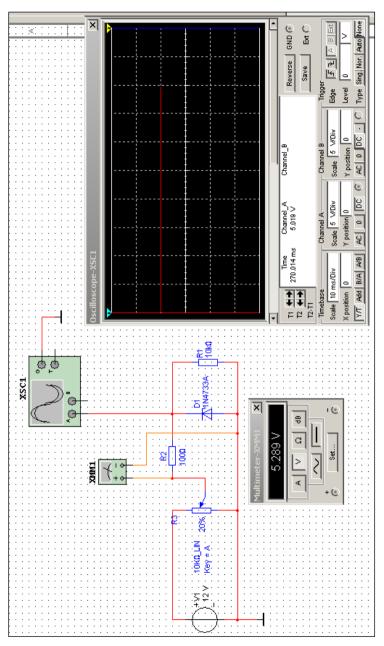


Рис. 9.6



Обратная ветвь					
№	$U_{ m cr},{ m B}$	$I_{\rm cr}$, м ${ m A}$			
1					
2					
3					
4					
5					

Контрольные вопросы

- 1. Дать определение стабилитрона.
- 2. Схема простейшего стабилитрона.
- 3. От чего зависит напряжение стабилизации стабилитрона?

Литература

- 1. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере. М.: Горячая линия Телеком, 2003.
- 2. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на *I*ВМ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 3. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Elect*R*on*I*cs Wo*R*kbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2: Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 4. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 6. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия Телеком, 2007.

Лабораторная работа 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ

Цель работы: исследование характеристик тиристора.

Теоретическая часть

Тиристор – это полупроводниковый прибор с тремя и более p-n-переходами, имеющий на BAX участок с отрицательным сопротивлением. Тиристоры используются в основном в схемах переключения.

Существуют двухэлектродные тиристоры — **динисторы**; трехэлектродные тиристоры — **тринисторы**, в которых возможно управление напряжением включения тиристора. Разработаны тиристоры, имеющие одинаковые ВАХ при различной полярности приложенного напряжения. Это симметричные тиристоры — **симисторы**. Включение тиристора как это следует из вышесказанного, можно проводить: а) путем медленного увеличения анодного напряжения; б) путем подачи напряжения на управляющий электрод. Возможно также включение тиристора путем быстрого увеличения анодного напряжения. При этом через прибор будут протекать значительные емкостные токи, приводящие к уменьшению напряжения включения с ростом скорости изменения напряжения dU/dt.

Тиристор – полупроводниковый переключатель – изготавливается из кремния и имеет три p-n-перехода (рис. 10.1, a). Напряжение питания E_a подается на тиристор так, что переходы Π_1 и Π_3 открыты, а переход Π_2 закрыт. Ток I_a , проходящий через тиристор, при этом будет определяться высоким сопротивлением закрытого перехода. На рис. 10.1, δ приведены вольтамперные характеристики тиристора для положительных значений напряжений. С увеличением напряжения U_a ток тиристора возрастает незначительно. Но при достижении напряжения $U_{\rm вкл}$ (см. рис. 10.1, δ) наступает электрический пробой в переходе Π_2 . При этом происходит лавинообразное увеличение числа носителей зарядов за счет лавинного умножения носителей в переходе Π_2 движущимися дырками и элек-

тронами. В результате этого ток I_a увеличивается скачком и напряжение на тиристоре уменьшается.

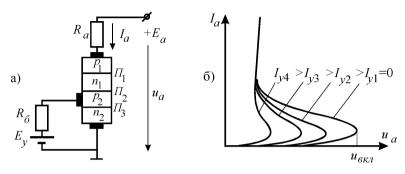


Рис. 10.1

В анодную цепь тиристора для ограничения тока включают резистор $R_{\rm a}$. При скачкообразном росте анодного тока увеличивается падение напряжения на резисторе $R_{\rm a}$ и напряжение на тиристоре уменьшается. Изменение анодного тока после наступления электрического пробоя производится изменением величины $R_{\rm a}$ или $E_{\rm a}$. Если снять питающее напряжение, то свойства p-n-перехода Π_2 восстанавливаются.

Напряжение $U_{\text{вкл}}$ можно снизить введением дополнительных носителей в любой из слоев, образующих переход Π_2 . Появление дополнительных носителей увеличивает число актов ионизации атомов в переходе, и поэтому напряжение $U_{\text{вкл}}$ уменьшается. Дополнительные носители зарядов, образующие ток $I_{\text{у}}$, вводятся в тиристор вспомогательной цепью от источника питания E_{y} . Влияние величины тока I_{y} на работу тиристора видно из рис. 10.1, δ .

При включении тиристора в обратном направлении переходы Π_1 и Π_3 будут закрыты, и в нем появится весьма небольшой ток. Во избежание пробоя тиристора в обратном направлении необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр.до}}$.

Задание

Экспериментально исследовать особенности ВАХ тиристора.

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- 2. Монитор.
- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

- 1. Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу **ELECTRONICS WORKBENCH**. После запуска она будет выглядеть, как показано на рис. 10.2.
- 2. Для работы необходимо загрузить схему исследования *«ЛР* № 11 *Тиристор.ms8»*.

При нажатии кнопки открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл и нажать кнопку «Открыть».

Появится схема, показанная на рис. 10.3.

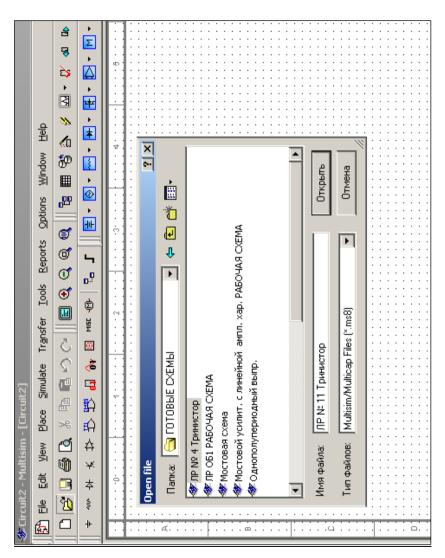
3. Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать

кнопку

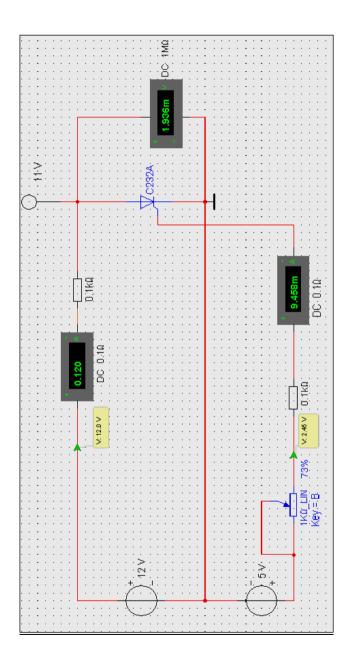
- 4. Изменяя переменным резистором (при нажатии клавиши сопротивление уменьшается, при нажатии комбинаций клавиш <shift>- сопротивление увеличивается) управляющий ток, определите ток и напряжение срабатывания тиристора при напряжениях питания 12 B, 24 B, 48 B.
 - 5. Данные измерений занести в табл. 10.1.

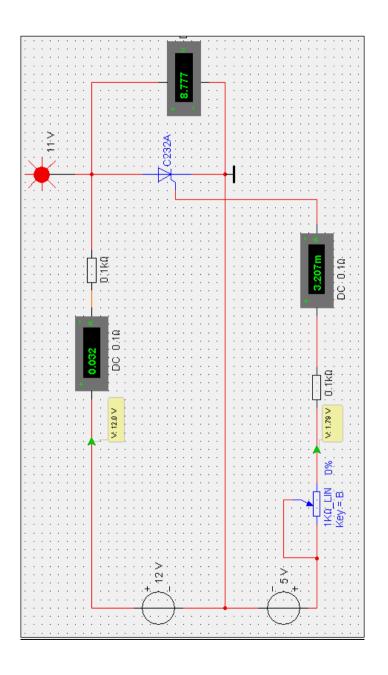
Таблтна 10.1

№	$U_{\scriptscriptstyle m BX},{ m B}$	$I_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}},\mathrm{A}$	$I_{ m ynpaвлeния},$ А
1.	12		
2.	24		
3.	48		



ис. 10.2





Контрольные вопросы

- 1. Каковы особенности ВАХ неуправляемого тиристора?
- 2. Какие составляющие токов протекают в управляемом тиристоре?
 - 3. Какими способами можно включить тиристор?
 - 4. Какими способами можно выключить тиристор?
- 5. Как меняется BAX триодного тиристора при изменении напряжения на управляющем электроде?
- 6. Начертите схему включения тиристора, выполняющего роль ключа.
- 7. Начертите схему включения тиристора для определения его параметров.

Литература

- 1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на *I*ВМ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 2. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Elect*RonIcs* Wo*R*kbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2: Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 5. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия Телеком, 2007.

Лабораторная работа 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы: исследование биполярного транзистора в схеме с обшей базой.

Теоретическая часть

В схеме с общей базой (ОБ) входным током является ток эмиттера, а выходным — ток коллектора. называется статическим коэффициентом усиления по току в схеме с ОБ = 0,8-0.99 таким образом, коэффициент усиления по току в схеме с ОБ меньше единицы. Коэффициент усиления по напряжению в схеме с ОБ больше единицы, так как $K = U_{\rm KG}/U_{\rm 26}$.

В смешенном в прямом направлении эмиттерном переходе приращение напряжения $U_{\rm of}$ мало, в то же время приращение $U_{\rm kf}$ может быть сколько угодно большим и определяется только допустимым напряжением коллекторного перехода.

Последовательно коэффициент усиления по мощности $K_p = K_u K I = K_u$ в схеме с ОБ больше единицы.

Статические характеристики схемы с ОБ состоят из семейства входных ВАХ ($I_3 = f(U)$ при $UK_6 = {\rm const}$), выходных ($I_{\rm K} = f(UK_6)$ при $I_3 = {\rm const}$) ВАХ и переходных характеристик $I_{\rm K} = f(I_3)$ при $U_{\rm KG} = {\rm const}$ или $U_{\rm BMX} = f({\rm J_{BX}})$ при $P_{\rm H} = {\rm const}$.

Входные характеристики снимаются на входной цепи при фиксированных напряжениях $U_{\kappa\delta}=0$ (режим короткого замыкания на выходе) характеристика подобна обычной характеристике п/п диода (её прямой ветви).

При $I_{\rm k}=0$ (обрыв на выходе) весь ток эмиттера замыкается через базу, поэтому падение напряжения на омическом сопротивлении базы увеличивается, и характеристика смещается вправо. Важным параметром является входное дифференциальное сопротивление транзистора в схеме с ОБ: $P_{\rm Bx}=U_{\rm Bx}$.

Обычно это сопротивление составляет от единиц (для мощных) до нескольких десятков ом (для маломощных транзисторов).

Выходные характеристики снимаются в выходной цепи при различных фиксированных значениях I_3 . Схема снятия ВАХ приве-

дена на рисунке. Снятие характеристик осуществляется при эквивалентном коротком замыкании на выходе и холостом ходе на входе. Переходную характеристику $I_{\rm K}=f(I_3)$ можно получить из выходных характеристик транзистора, зафиксировав какое-либо напряжение и построив зависимость $I_{\rm K}=f(I_3)$ по точкам. Переходная характеристика может быть снята и непосредственно при фиксированном значении UK_6 в схеме.

Задание

Снять семейства ВАХ транзистора в схемах с ОБ (рис. 11.1).

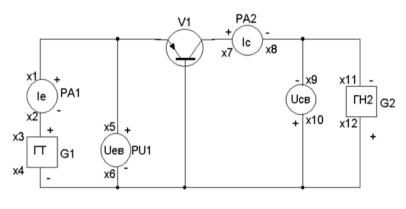


Рис. 11.1

Приборы и оборудование

- 1. Стенд для проведения работ 87Л-01.
- 2. Встроенные источники питания ГН, ГН1, ГН2.
- 3. Встроенные изм. приборы ИВ, АВО, АВМ1
- 4. Сменные платы № 5, № 6, № 12.

Порядок выполнения работы

1. Установить сменную плату № 5. В качестве PA1 использовать ИВ, PA2 – ABM2, P1 – ABO, P2 – ABM1. Используемый транзистор МП-40. В качестве генератора напряжения использовать Γ H2.

- 2. Закоротить точки X_1, X_2 .
- 3. Ручки регулировки ГТ, ГН2 установить в крайнее левое положение.
- 4. Включить тумблер "Сеть" и тумблеры ГТ: ГН2. Переключатель ИВ установить на ГТ. **Установить ток** ГТ = 0. Убедитесь что показание PA2 = 0 получается при U = 0 (РИ = 0). **Плавно увеличивая** UK_{δ} (ГН2), фиксировать ток I_{κ} по PA2. Особое внимание обратить на начальный участок характеристики $I_{\kappa\delta}$.
- 5. **Установить ток** ГТ=0. Убедитесь что показание РА2=0 получается при U=0 (РИ = 0). **Плавно увеличивая** UK_6 (ГН2), фиксировать ток I_{κ} по РА2. Особое внимание обратить на начальный участок характеристики $I_{\kappa 6}$.
- **6.** Последовательно установить ток I_6 (ГТ) = 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5. Плавно изменяя напряжение $U_{\kappa 6}$ (ГН2), зафиксировать ток I_{κ} . Значения напряжения U_6 (ГН2) должны быть теми же, что и в п.5. Одновременно при снятии U_{36} обязательно зафиксировать точку при $U_{\kappa 6}$ = 5 B, I_3 = 3 мА.

Данные занести в табл. 11.1.

Таблица 11.1

<i>U</i> бэ, В	I ₂ , MA							
	$U_{\kappa\delta} = 0 \text{ B}$	$U_{z} = 0 \text{ B}$ $U_{z} = -5 \text{ B}$ $U_{z} = -10 \text{ B}$						

Установить $U_{\kappa 6} = 5$ В. Давая $I_{\scriptscriptstyle 3}$ значения в соответствии с пп. 5 и 6, снять зависимость $I_{\scriptscriptstyle K}$ от $I_{\scriptscriptstyle 3}$. Затем то же самое *проделать* при $U_{\kappa 6} = 7$ В.

Данные занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

$U_{\kappa 6}$, В	I_{κ} , MA					
	$I_9 = 5 \text{ MA}$ $I_9 = 2 \text{ MA}$ $I_9 = 3 \text{ MA}$					

Построить на одном графике переходные характеристики I_{κ} = $I_{\mathfrak{I}}$ при разных $U_{\kappa \mathfrak{G}}$.

Контрольные вопросы

- 1. Чем отличается схема с ОЭ от схемы с ОБ?
- 2. Что такое коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ и как он связан?
 - 3. Что такое коэффициент усиления по току в схеме с ОБ?
- 4. Нарисуйте семейство входных BAX и объясните их поведение.
- 5. Нарисуйте семейство выходных ВАХ и объясните их поведение.
- 6. Чем отличается режим насыщения в схеме с ОЭ от режима отсечки в схеме с ОБ?
- 7. Чем отличается закрытое состояние транзистора в схеме с ОЭ от режима отсечки в схеме с ОБ?

Литература

- 1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на *I*ВМ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 2. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Elect*R*on*I*cs Wo*R*kbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2: Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 5. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия Телеком, 2007.

Лабораторная работа 12

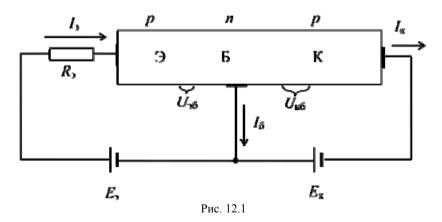
ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

Цель работы: экспериментальное исследование характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой.

Теоретическая часть

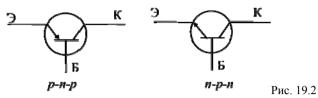
Транзистор — полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления и/или генерирования электрических колебаний.

Биполярный транзистор /1/ — полупроводниковый усилительный прибор с двумя или более очень близко расположенными и взаимодействующими между собой *p-n*-переходами, включенными встречно, и двумя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Классическая структура биполярного транзистора (БТ) реализуется на основе трех полупроводниковых областей (рис. 19.1) с различными типами электропроводности.



В транзисторе p-n-p одна из p-областей называется эмиттером, вторая — κ оллектором, средняя n-область является κ 0 для транзистора κ 1 типы проводимостей этих областей меняются.

На рис. 12.2 приведено условное обозначение указанных транзисторов.



Если к эмиттерному переходу приложить прямое напряжение (соответствующее проводящему направлению), а к коллекторному – обратное (см. рис. 12.1), то потенциальный барьер эмиттерного перехода снизится на $U_{\rm 36}$, а потенциальный барьер коллекторного перехода увеличится на $U_{\rm \kappa 6}$ (см. рис. 12.4).

Уменьшение высоты потенциального барьера эмиттерного перехода приводит к увеличению количества дырок, преодолевающих его и переходящих в базу. Распределение их концентрации показано на рис. 12.3.

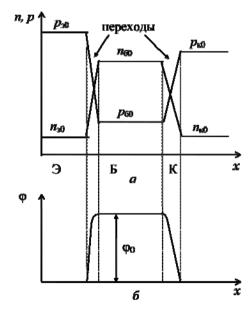


Рис. 12.3

Вследствие диффузии дырки движутся в сторону коллекторного перехода, поле которого является ускоряющим для них. Часть из них рекомбинирует с электронами в базе. Восполнение же электронов происходит через базовый электрод в виде тока базы. Через этот же электрод протекает обратный ток коллекторного перехода $I_{\rm k0}$. Большая часть дырок втягивается в коллекторную область и образует дополнительную составляющую коллекторного тока.

Для БТ выполняется соотношение (см. рис. 12.1)

$$I_9 = I_K + I_{6}$$

где $I_{\scriptscriptstyle 3},\,I_{\scriptscriptstyle K}$, $I_{\scriptscriptstyle 6}$ – соответственно токи эмиттера, коллектора и базы.

Отношение $\infty = \Delta I_{\rm k}/\Delta I_3 \, \Big|_{\Delta U_{\rm k0}} = 0$ называется коэффициентом передачи тока от эмиттера к коллектору (передачи эмиттерного тока в коллекторную цепь) и показывает количественно: какая часть дырок, перешедших эмиттерный переход, достигает коллекторного

перехода. Вид ВАХ транзистора зависит от схемы включения. Возможны три схемы включения в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). На практике распространены две первые.

На рис. 12.5 приведена входная ВАХ БТ, включенного по схеме с ОБ – $I_3 = f(U_{36})$, а на рис. 19.6 выходная ВАХ того же транзистора.

При
$$I_9 = 0$$
 $I_{\kappa} = I_{\kappa 0}$.

При
$$I_9 \neq 0$$
 $I_{\kappa} = I_{\kappa 0} + \alpha I_9$.

Некоторое увеличение $I_{\rm k}$ с ростом $|U_{\rm k6}|$ при $I_{\rm 9}$ = const объясняется расширением коллекторного перехода, что приводит к сужению базы и увеличению коэффициента α (модуляцией базы).

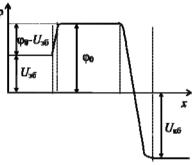


Рис. 12.4

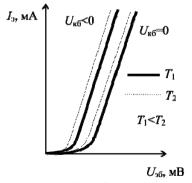


Рис. 12.5

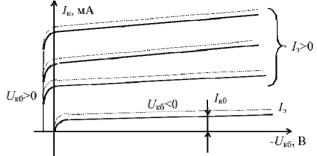
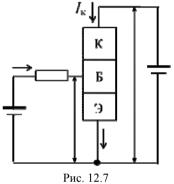


Рис. 12.6

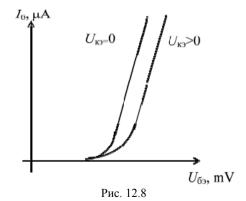


Входные и выходные ВАХ БТ, включенного по схеме с ОЭ (рис. 12.7), приведены на рис. 12.8 и 12.9. Зависимость между входным током I_6 и выходным – $I_{\rm k}$ для данной схемы включения определяется как

$$I_{\Box} = \frac{I_{\Box 0}}{1 - \alpha} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\sharp} =$$

$$= (\beta + 1)I_{\Box 0} + \beta I_{\sharp},$$
(12.1)

где $\beta=\alpha/(1-\alpha)=\Delta I_{\rm k}/\Delta I_{\rm 6}$ — коэффициент передачи тока от базы к коллектору (передачи базового тока в коллекторную цепь). При $I_{\rm 6}=0$ $I_{\rm k}=I_{\rm k0}(\beta+1)=I_{\rm k0}$.



114

При увеличении выходных напряжений ($U_{\kappa \delta}$ для схемы с ОБ, $U_{\kappa 9}$ – ОЭ) сверх некоторого допустимого напряжения I_{κ} резко нарастает, что приводит к пробою коллекторного перехода.

При изменении температуры окружающей среды БТ изменяются $I_{\kappa 0}$ и коэффициент α , что приводит к смещению выходных характеристик вверх или вниз (см. рис. 12.6). Смещение входных ВАХ (см. рис. 12.5) при изменении температуры объясняется теми же причинами, что и для прямой ветви ВАХ диода.

Вследствие наличия емкостей эмиттерного и коллекторного переходов и конечной скорости перемещения носителей через базу коэффициенты α и β уменьшаются с ростом частоты входного сигнала. Указанные факторы также приводят к созданию сдвига по фазе между входным и выходным сигналами. В целом зависимость коэффициента α от частоты определяется выражением

$$\alpha(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}},$$

а коэффициента В – выражением

$$\beta(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_B}}.$$

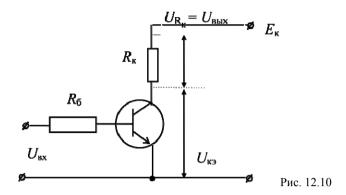
Частота f_{α} , при которой $\alpha = \alpha_0/\sqrt{2}$, где α_0 – коэффициент передачи тока эмиттера при f=0, называется *предельной*. Для схемы с ОЭ предельная частота $f_{\rm B}$ предполагает, что $\beta = \beta_0/\sqrt{2}$.

Для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, $f_{\beta} = f_{\alpha}/\beta$.

Для БТ по схеме с ОЭ также вводится понятие *граничной* частоты f_r , на которой модуль β становится равным 1.

Обычно частотные свойства транзистора характеризуют с помощью амплитудно-частотной характеристики (AЧX), отображающей зависимость модуля коэффициента передачи тока (α или β) от частоты, и фазо-частотной характеристики (Φ ЧX), показывающей изменение фазового сдвига при изменении частоты.

На практике в цепь коллектора БТ включается нагрузочное сопротивление, с которого снимается выходной сигнал (рис. 12.10).



Тогда $U_{\rm к3}+I_{\rm k}$ $R_{\rm k}=E_{\rm k}$. Данное уравнение описывает прямую, которая называется *линией нагрузки* (рис. 12.11). Из рисунка видно, что при работе транзистора с нагрузкой $I_{\rm k}$ зависит не только от $I_{\rm 6}$, но и от напряжения $U_{\rm k3}$. Для схемы с ОБ $I_{\rm 6}$ заменяется на $I_{\rm 2}$, а $U_{\rm k3}$ — на $U_{\rm k6}$.

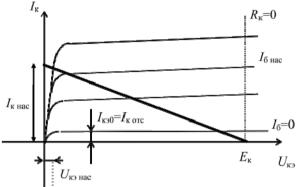


Рис. 12.11

В зависимости от того, какой участок выходных ВАХ пересекает линия нагрузки, различают три режима работы БТ: активный, насыщения и отсечки.

В активном режиме сохраняется зависимость $I_{\rm k}=f(I_{\rm 6})$ в виде выражения (12.1). Когда $I_{\rm 6}=I_{\rm 6~hac},~I_{\rm k~hac}=(E_{\rm k}-U_{\rm k9})/R_{\rm k}\approx E_{\rm k}/R_{\rm k},$ так как $U_{\rm k9~hac}<< E_{\rm k}.$

В режиме отсечки $I_{\kappa} \approx I_{\kappa > 0}$.

Активный режим транзистора обычно используется в усилительных схемах, а насыщения и отсечки – в импульсных.

Задание

Исследовать входные и выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общей базой.

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- 2. Монитор.
- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

1. Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу **ELECTRONICS WORKBENCH**. После запуска она будет выглядеть, как показано на рис. 12.12.

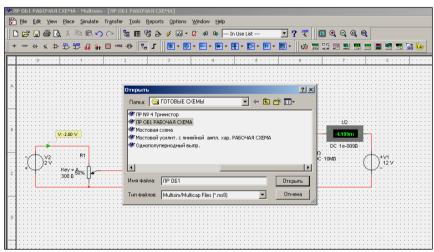


Рис. 12.12

2. Для работы необходимо загрузить схему исследования «ЛР OБ1.ms8». При нажатии кнопки открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл и нажать кнопку «Открыть». Появится схема, имеющая вид, показанный на рис. 12.13.

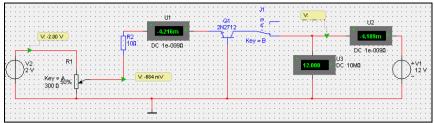


Рис. 12.13

- 3. Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку
- 4. Изменяя переменным резистором (при нажатии клавиши <A> сопротивление уменьшается, при нажатии комбинаций клавиши <shIft>-<A> сопротивление увеличивается) входное напряжение (U_{36}) от 0 до 0,9 B, снять входную характеристику транзистора $I_3 = f(U_{36})$ при напряжении коллектора (U_{K6}) 0; 5; 10 B (U_{K6}) = 0, при отключённом тумблере (Key B)). Данные занести в табл. 12.1.

Таблица 12.1

$U_{\kappa\delta}\left(\mathbf{B}\right)$	$U_{\mathfrak{I}}\left(\mathbf{B}\right)$	$I_{\mathfrak{I}}(MA)$
$U_{ ext{ iny KO}}\!\!=\!\!0$		
U _{кб} =5		
<i>U</i> кб=10		

5. Повторяя действия п. 2, открываем следующую схему «ЛР OБ2.ms8» (рис. 12.14)

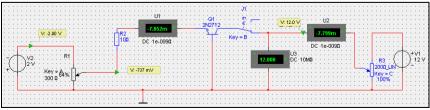


Рис. 12.14

6. Изменяя напряжение коллектора ($U_{\kappa 6}$) от 0 до 10 В, снять положительную ветвь выходной характеристики транзистора $I_{\kappa} = f(U_{\kappa 6})$ при установке эмиттерного тока (I_{3}) 10, 20 и 30 мА. Данные занести в табл. 12.1.

Таблица 12.1

<i>I</i> _э , мА	$U_{\kappa 6}$, В	I_{κ} , MA
$I_9 = 10$		
$I_9 = 20$		
$I_{3} = 30$		

- 7. По данным измерений постройте входные и выходные характеристики транзистора.
 - 8 Напишите отчет

Контрольные вопросы

- 1. Способен ли транзистор усиливать ток?
- 2. Почему коэффициент передачи тока α растет при увеличении напряжения $U_{\kappa 6}$?
 - 3. Как соотносится коэффициент а с единицей?
 - 4. Чем характеризуется активный режим работы транзистора?
 - 5. Почему нагрузочная линия является прямой?

Литература

- 1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 2. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на ElectRonIcs WoRkbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2: Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.

- 3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 5. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия Телеком, 2007.
- 6. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере. М.: Горячая линия Телеком, 2003.

Лабораторная работа 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОЭ

Цель работы: изучение принципа действия биполярного транзистора.

Теоретическая часть

Биполярный транзистор представляет собой п/п прибор, состоящий из трех областей с чередующимися типами электропроводности, пригодные для усиления мощности. Области разделяются электронно-дырочными переходами Особенность транзистора состоит в том. что между электронно-дырочными переходами существует взаимодействие- ток одного из переходов может управлять током другого.

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима транзистора:

- 1) режим отсечки оба перехода закрыты. При этом через транзистор идёт сравнительно небольшой ток;
 - 2) режим насыщения оба перехода открыты;
- 3) активный режим один из переходов открыт, а другой закрыт.

Возможны три схемы подключения транзистора к источникам питания в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общей точкой с общим эмиттером 1 (рис. 2) общим коллектором (рис.3) при этом необходимо отметить, что схема включения никак не сказывается на физике работы транзистора, а влияет только на его характеристики.

Схема с ОЭ отличается от схемы с ОБ тем, что источников второго напряжения и источника питания общей точкой является эмиттер, поэтому входным током является ток базы, выходным — ток коллектора, а напряжение питания приложено между эмиттером и коллектором.

Статические характеристики транзистора представляют собой зависимости:

• $I_6 = f(U_{96})$ при $U_{\kappa_9} = \text{const}$ (семейство входных BAX);

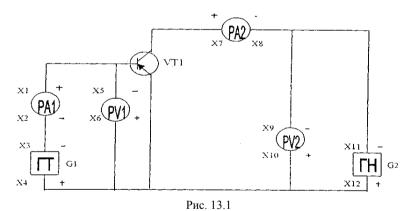
- $I_{\kappa} = f(U_{\kappa 3})$ при $I_{\delta} = \text{const}$ (семейство выходных BAX);
- переходные характеристики $I_{\kappa} = f(I_6)$ при $U_{\kappa 3} = \text{cosnt.}$

Семейство входных характеристик показано на рис. При $U_{\rm k\delta}$ = 0 эмиттерный и коллекторный переходы включены параллельно и I_6 = I_6 + - $I_{\rm k}$, т.е. транзистор не имеет усилительных свойств. Входная ВАХ при этом идет как прямая ветвь обычного диода.

При увеличении $U_{\rm K3}$ ток коллекторного перехода меняет знак. В этом случае $I_6=I_9+$ - $I_{\rm K}$, т. е. ток базы резко уменьшается, и входная характеристика располагается значительно ниже, обычно для этого достаточно иметь $U_{\rm K3}=0$. Дальнейшее увеличение $U_{\rm K3}$ приводит к очень незначительному уменьшению наклона характеристики, так что практически можно считать, что при $U_{\rm K3}=0$ входные характеристики схемы ОЭ выражаются в ОДНУ кривую. В справочниках приводится ВАХ при $U_{\rm K3}=5$ В.

Задание

Снять семейство ВАХ транзистора в схемах с ОЭ (рис. 13.1).



Приборы и оборудование

- 1. Стенд для проведения лабораторных работ 87Л-*UI*.
- 2. Встроенные источники питания ГТ. ГН1.ГН2.
- 3. Встроенные измерительные приборы ИВ, ABU, ABM.
- 4. Сменные панели № 5, № 6, № 12.

Порядок выполнения работы

- 1. Установить сменную плату № 6. В качестве РА1 использовать ИВ (переключатель ИВ установить в положение Γ Т); в качестве РИ1 ABM2, PA2 ABO, PИ2 ABM1, в качестве испытуемого прибора транзистор МП-40.
- 2. Ручки регулирования ГТ и ГН установить в крайнее левое положение.
 - 3. Закоротить точки X1 и X2.
 - 4. Включить тумблер «сеть».
- 5. При токе $\Gamma T \neq 0$, плавно увеличивая напряжение $\Gamma H_{:}$ снять характеристики I_{κ_3} (достаточно 5–6 отсчетов) и U_{κ_3} . Причем в начале характеристики точки должны располагаться чаше, а в конце реже.
 - 6. Данные занести в табл. 13.1.

Таблица 13.1

U_{69} , B	<i>I</i> ₆ , мА					
	$U_{\kappa 9} = 0 \text{ B}$	$U_{\text{\tiny KS}} = -3 \text{ B}$	$U_{\kappa_3} = -8 \text{ B}$			

7. Переключить PA2 на ABM1, PИ1 на ABMO. Увеличить поочередное значение тока через 0,1 мА, снять выходные характеристики транзистора, устанавлиить напряжение ГН таким же, как при снятии $I_{\kappa 9}$. При этом фиксировать $U_{\kappa 9}$, U_{69} , I_{κ} . Данные внести в табл. 13.1.

Внимание! Ток I_{κ} не должен превышать 20 мА.

- 8. Источник тока подключить к точке X3 плюсом, к точке X4 минусом. Установить $\Gamma H = 5$ B, плавно увеличивая ток ΓT , добиться того, чтобы показания параметры при $U_{\rm K3} = 5$ B и $I_6 = 0,3$ мА.
 - 9. Выключить тумблер «Сеть».
- 10. Установить сменную плату № 14. Резисторы P1 и R5, конденсаторы C3 и C4 не устанавливать. Вместо R4 установить перемычку, вместо R2 источник Γ Т плюсом на точку X4. Вместо C2 установить перемычку. Резистор $R_3 = 1$ кОм, емкость $C_1 = 50$ мкФ. АВМ подключить между точками X1 и X3.

- 11. Установить ручки регулировки ГН4 и ГТ в крайнее левое положение. В качестве E_C использовать ГН.
 - 12. Включить тумблер «Сеть».
- 13. Переключить ИВ в положение ГТ. Плавно изменяя ток ГТ. снять переходную хар-ку $U_{\kappa_9} = (I_6)$, фиксируя U_{κ_9} по ABM1.

$$E_{\text{пит}} = 15 \text{ B}, R_{\text{H}} = 1 \text{ кОм}.$$

Данные занести в табл. 13.2.

Таблина 13.2

$U_{\kappa 9}$, B	I _K , MA				
	$I_6 = 0.05 \text{ mA}$	$I_6 = 0.1 \text{ mA}$	$I_6 = 0.2 \text{ mA}$		

- 14. Построить график переходной характеристики и определить в середине прямоугольного участка.
 - 15 Написать отчет

Контрольные вопросы

- 1. Чем отличается схема с ОЭ от схемы ОБ?
- 2. Что такое коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ и как он связан?
 - 3. Что такое коэффициент усиления по току в схеме с ОБ?
- 4. Нарисуйте семейство входных ВАХ и объясните их поведение.
- 5. Чем отличается режим насыщения в схеме с ОЭ от режима насыщения в схеме с ОБ?
- 6. Нарисуйте семейство выходных ВАХ и объясните их поведение.
- 7. Чем отличается «закрытое» состояние транзистора в схеме с ОЭ от режима «отсечки» транзистора в схеме с ОБ?
- 8. Нарисуйте схемы для снятия входных и выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ.

Лабораторная работа 14

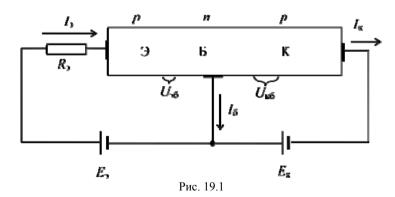
ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Цель работы: экспериментальное исследование статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Теоретическая часть

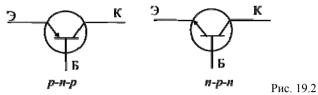
Транзистор — полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления и/или генерирования электрических колебаний.

Биполярный транзистор /1/ — полупроводниковый усилительный прибор с двумя или более очень близко расположенными и взаимодействующими между собой *p-n*-переходами, включенными встречно, и двумя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Классическая структура биполярного транзистора (БТ) реализуется на основе трех полупроводниковых областей (рис. 19.1) с различными типами электропроводности.



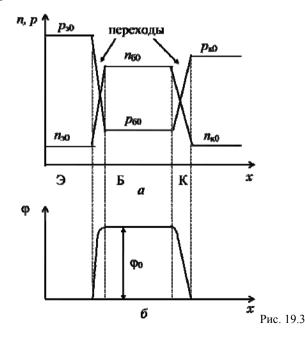
В транзисторе p-n-p одна из p-областей называется эмиттером, вторая — κ оллектором, средняя n-область является κ базой. Для транзистора κ 0 типы проводимостей этих областей меняются.

На рис. 19.2 приведено условное обозначение указанных транзисторов.



Если к эмиттерному переходу приложить прямое напряжение (соответствующее проводящему направлению), а к коллекторному – обратное (см. рис. 14.1), то потенциальный барьер эмиттерного перехода снизится на U_{96} , а потенциальный барьер коллекторного перехода увеличится на $U_{\kappa 0}$ (см. рис. 14.4).

Уменьшение высоты потенциального барьера эмиттерного перехода приводит к увеличению количества дырок, преодолевающих его и переходящих в базу. Распределение их концентрации показано на рис. 14.3.



Вследствие диффузии дырки движутся в сторону коллекторного перехода, поле которого является ускоряющим для них. Часть из них рекомбинирует с электронами в базе. Восполнение же электронов происходит через базовый электрод в виде тока базы. Через этот же электрод протекает обратный ток коллекторного перехода $I_{\rm k0}$. Большая часть дырок втягивается в коллекторную область и образует дополнительную составляющую коллекторного тока.

Для БТ выполняется соотношение (см. рис. 14.1)

$$I_9 = I_K + I_{6}$$

где I_3 , $I_{\rm K}$, $I_{\rm G}$ — соответственно токи эмиттера, коллектора и базы.

Отношение $\infty = \Delta I_{\rm k}/\Delta I_3 \Big|_{\Delta U_{\rm k0}} = 0$ называется коэффициентом передачи тока от эмиттера к коллектору (передачи эмиттерного тока в коллекторную цепь) и показывает количественно: какая часть дырок, перешедших эмиттерный переход, достигает коллекторного

перехода. Вид ВАХ транзистора зависит от схемы включения. Возможны три схемы включения в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). На практике распространены две первые.

На рис. 14.5 приведена входная ВАХ БТ, включенного по схеме с ОБ – $I_3 = f(U_{96})$, а на рис. 14.6 выходная ВАХ того же транзистора.

При
$$I_9 = 0$$
 $I_K = I_{K0}$.
При $I_9 \neq 0$ $I_K = I_{K0} + \alpha I_9$.

Некоторое увеличение I_{κ} с ростом $|U_{\kappa 6}|$ при I_3 = const объясняется расширением коллекторного перехода, что приводит к сужению базы и увеличению коэффициента α (модуляцией базы).

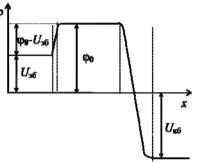


Рис. 14.4 где ссылка в тексте?

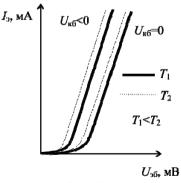


Рис. 14.5

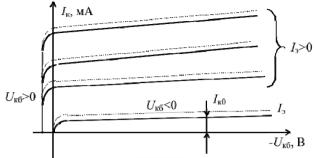
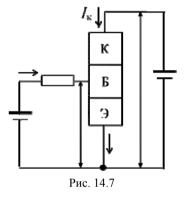


Рис. 14.6



Входные и выходные ВАХ БТ, включенного по схеме с ОЭ (рис. 14.7), приведены на рис. 14.8 и 14.9. Зависимость между входным током I_6 и выходным – $I_{\rm k}$ для данной схемы включения определяется как

$$I_{\Box} = \frac{I_{\Box 0}}{1 - \alpha} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\ddagger} = (14.1)$$

= $(\beta + 1)I_{\Box 0} + \beta I_{\ddagger}$,

где β = $\alpha/(1-\alpha)$ = $\Delta I_{\kappa}/\Delta I_{\delta}$ — коэффици-

ент передачи тока от базы к коллектору (передачи базового тока в коллекторную цепь). При $I_6 = 0$ $I_{\kappa} = I_{\kappa 0}(\beta + 1) = I_{\kappa 30}$.

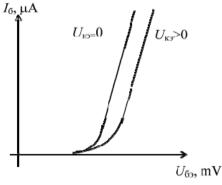


Рис. 14.8

нет рис. Рис. 14.9

При увеличении выходных напряжений ($U_{\kappa\delta}$ для схемы с ОБ, $U_{\kappa\beta}$ – ОЭ) сверх некоторого допустимого напряжения I_{κ} резко нарастает, что приводит к пробою коллекторного перехода.

При изменении температуры окружающей среды БТ изменяются $I_{\kappa 0}$ и коэффициент α , что приводит к смещению выходных характеристик вверх или вниз (см. рис. 14.6). Смещение входных ВАХ (см. рис. 14.5) при изменении температуры объясняется теми же причинами, что и для прямой ветви ВАХ диода.

Вследствие наличия емкостей эмиттерного и коллекторного переходов и конечной скорости перемещения носителей через базу коэффициенты α и β уменьшаются с ростом частоты входного сигнала. Указанные факторы также приводят к созданию сдвига по фазе между входным и выходным сигналами. В целом зависимость коэффициента α от частоты определяется выражением

$$\alpha(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}},$$

а коэффициента В – выражением

$$\beta(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_B}}.$$

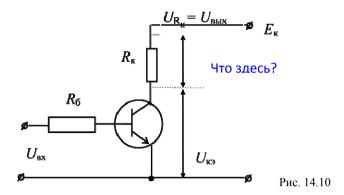
Частота f_{α} , при которой $\alpha = \alpha_0/\sqrt{2}$, где α_0 – коэффициент передачи тока эмиттера при f=0, называется *предельной*. Для схемы с ОЭ предельная частота $f_{\rm B}$ предполагает, что $\beta = \beta_0/\sqrt{2}$.

Для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, $f_{\beta} = f_{\alpha}/\beta$.

Для БТ по схеме с ОЭ также вводится понятие *граничной* частоты f_r , на которой модуль β становится равным 1.

Обычно частотные свойства транзистора характеризуют с помощью амплитудно-частотной характеристики (AЧX), отображающей зависимость модуля коэффициента передачи тока (α или β) от частоты, и фазо-частотной характеристики (Φ ЧX), показывающей изменение фазового сдвига при изменении частоты.

На практике в цепь коллектора БТ включается нагрузочное сопротивление, с которого снимается выходной сигнал (рис. 14.10).



Тогда $U_{\kappa_3}+I_{\kappa}$ $R_{\kappa}=E_{\kappa}$. Данное уравнение описывает прямую, которая называется *линией нагрузки* (рис. 14.11). Из рисунка видно, что при работе транзистора с нагрузкой I_{κ} зависит не только от I_{6} , но и от напряжения U_{κ_3} . Для схемы с ОБ I_{6} заменяется на I_{2} , а U_{κ_3} — на U_{κ_6} .

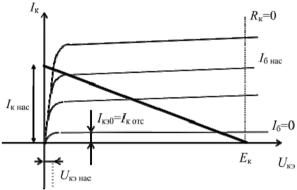


Рис. 14.11

В зависимости от того, какой участок выходных ВАХ пересекает линия нагрузки, различают три режима работы БТ: активный, насыщения и отсечки.

В активном режиме сохраняется зависимость $I_{\rm k}=f(I_{\rm 6})$ в виде выражения (12.1). Когда $I_{\rm 6}=I_{\rm 6~hac},~I_{\rm k~hac}=(E_{\rm k}-U_{\rm k9})/R_{\rm k}\approx E_{\rm k}/R_{\rm k},$ так как $U_{\rm k9~hac}<< E_{\rm k}.$

В режиме отсечки $I_{\kappa} \approx I_{\kappa > 0}$.

Активный режим транзистора обычно используется в усилительных схемах, а насыщения и отсечки – в импульсных.

Задание

Исследовать входные и выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- 2. Монитор.
- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

1. Приступая к выполнению лабораторной работы необходимо запустить программу **ELECTRONICS WORKBENCH**. После запуска она будет выглядеть, как показано на рис. 14.12.

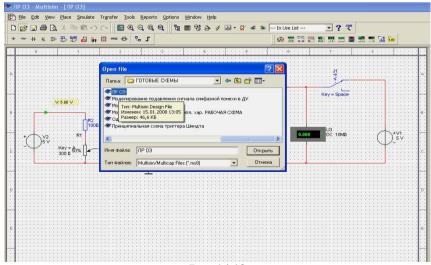


Рис. 14.12

2.Для работы необходимо загрузить схему исследования «ЛР OЭ.ms8». При нажатии кнопки открывается окно, в котором

курсором необходимо пометить файл и нажать кнопку «Открыть». Появится схема, показанная на рис. 14.13.

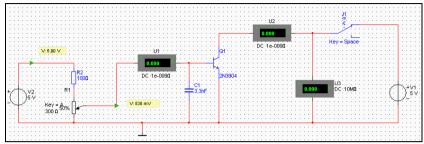


Рис. 14.13

- 3. Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку
- 4. Изменяя переменным резистором (при нажатии клавиши <A> сопротивление уменьшается, при нажатии комбинаций клавиш <shift>-<A> сопротивление увеличивается) входное напряжение (U_{69}) от 0 до 0,9 B, снимите зависимость базового тока (I_{6}) от напряжения база-эмиттер (U_{69}) при установке коллекторного напряжения $U_{\kappa 9}=0$; 5; 10 B (входная характеристика транзистора $I_{6}==f(U_{69})$, $U_{\kappa 9}=0$ обеспечивается при выключении тумблера (клавиша «**Пробел-Space**»).

Данные занести в табл. 14.1.

Таблица 14.1

$U_{\kappa 6}$, В	$U_{\mathfrak{B}}$, B	I_3 , MA
$U_{\kappa\delta} = 0$		
U _{кб} =5		
$U_{\kappa6} = 10$		

- 5. Изменяя переменным резистором (клавиша <T>, или <shift>-<T>) напряжение коллектора (U_{κ_3}) от 0 до 8 В, снимите зависимость коллекторного тока (I_{κ}) от напряжения коллекторэмиттер (U_{κ_3}) при установке тока базы (I_{δ}) 0,1; 0,2 мА (выходная характеристика транзистора $I_{\kappa} = f(U_{\kappa_3})$.
- 6. По данным измерения построить входные и выходные характеристики транзистора.
- 7. Определить по характеристикам транзистора графоаналитическим методом параметры транзистора:

входное сопротивление транзистора $R_{\rm BX} = \Delta U_{\rm G2}/\Delta I_{\rm G};$ выходное сопротивление транзистора $R_{\rm BMX} = \Delta U_{\rm K2}/\Delta I_{\rm K};$ коэффициент усиления транзистора $\beta = \Delta I_{\rm K}/\Delta I_{\rm G}.$

8. Составить отчет по требуемой форме.

Контрольные вопросы

- 1. Способен ли транзистор усиливать ток?
- 2. Почему коэффициент передачи тока α растет при увеличении напряжения $U_{\, \mbox{\tiny KG}} ?$
 - 3. Как соотносится коэффициент α с единицей?
 - 4. Чем характеризуется активный режим работы транзистора?
 - 5. Почему нагрузочная линия является прямой?

Литература

- 1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на ІВМ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 2. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на ElectRonIcs WoRkbench. В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2. Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 5. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия-Телеком, 2007.

Лабораторная работа 15

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы: исследование резистивного усилителя низкой частоты на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

Теоретическая часть

Усилитель напряжения низкой частоты (УНЧ) чаще всего выполняется на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис. 15.1), так как в этом случае получают наибольшее усиление сигнала по мощности (по сравнению с двумя другими схемами включен транзистора — с общей базой и общим коллектором).

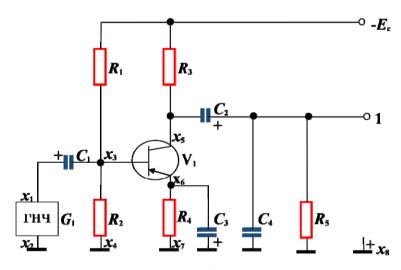


Рис. 15.1

Рабочую точку усилительного каскада выбирают в каждом конкретном случае зависимости от параметров, которыми должен обладать усилитель.

Основными требованиями, которые предъявляют к УНЧ, являются:

- ✓ максимальное усиление по напряжению, что позволяет сократить количество каскадов и, следовательно, упростить и дешевить схему;
 - ✓ минимальные частотные и нелинейные искажения:
- ✓ высокая экономичность, что особенно необходимо в портативной аппаратуре с автономными источниками питания (батареи, аккумуляторы);
- ✓ температурная стабильность (т.е. устройство должно сохранять работоспособность в заданном интервале температур).

Выполнение всех этих требований одновременно невозможно. Так, при большом усилении снижается устойчивость работы усилителя, который легко возбуждается, превращаясь в генератор, и его нормальное функционирование нарушается. Увеличение температурной стабильности обязательно сопровождается снижением усиления и КПД.

В данной работе исследуется усилитель, к которому предъявляется единственное требование: минимальные искажения усиливаемого сигнала при максимальном использовании возможностей транзистора. Выбор рабочей точки транзистора в этом случае сводится к четырем этапам.

1. На семействе выходных характеристик транзистора (рис. 15.2, a) строят нагрузочную прямую (E_C и R_3 для упрощения расчетов считаются заданными) (рис. 15.1, δ), которая графически изображает уравнение коллекторной цепи транзистора по постоянному току (падение напряжения на резисторе R_4 для простоты не учитывают):



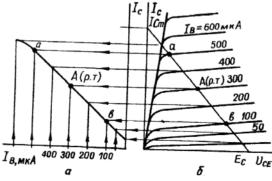


Рис 15.2

Для построения нагрузочной прямой определяют координаты точек пересечения ее с осями I_C и U_{CE} , поочередно приравнивая к нулю I_C и U_{CE} . При I_C = 0 уравнение (15.1) принимает вид $U_{CE} = E_C$. Это состояние соответствует закрытому транзистору. Так как коллекторного тока нет, нет и падения напряжения на резисторе R_3 , а следовательно, напряжение на коллекторе равно напряжению источника питания.

При
$$U_{\rm CE}=0$$
 уравнение (15.1) принимает вид $I_{\rm C}=I_{\rm Cm}=\frac{E_{\rm C}}{R_{\rm 3}}$. Это

состояние соответствует насыщенному транзистору. Правда, насыщенный транзистор имеет некоторое остаточное напряжение, но оно невелико и им можно пренебречь. Таким образом, точками пересечения нагрузочной характеристики с координатными осями $I_{\rm C}$ и $U_{\rm CE}$ являются точки $I_{\rm Cm}$ и $E_{\rm C}$.

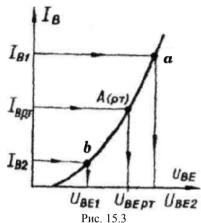
- 2. Точки пересечения выходных характеристик с нагрузочной прямой переносят в систему координат $I_C I_B$ и строят переходную характеристику каскада $I_C = f(I_B)$, которая показана на рис. 15.2, a, используют линейный участок a-b переходной характеристики; рабочая точка A(p.t.) каскада под действием входного сигнала должна оставаться в пределах этого участка. В этом случае нелинейные искажения минимальны. Действительно, смещение рабочей точки вверх за точку а приведет к насыщению транзистора, смещение вниз за точку $b-\kappa$ отсечке. В том и другом случаях транзистор перестает управляться входным сигналом, следовательно, форма входного сигнала не будет повторяться на выходе усилителя, что свидетельствует о возросших нелинейных искажениях.
- 3. Середина участка a—b будет искомой рабочей точкой A (р.т.), координаты которой представляют собой электрические параметры транзистора по постоянному току (режимы его входной и выходной цепей). Проекции рабочей точки A (р.т.) на оси I_C — I_B и I_C — I_B позволяют получить ток базы $I_{Bp,T}$ и коллектора $I_{Cp,T}$. Возвращение рабочей точки A (р.т.) на нагрузочную прямую позволяет получить напряжение коллектор—эмиттер $U_{Cp,T}$ как ее проекцию на ось U_{CE} . Характеристики, показанные на рис. 15.2, позволяют, кроме того, определить максимальные и минимальные токи базы и коллектора, а также максимальное и минимальное напряжение на нем, как проекции точек a и b на соответствующие оси.

4. Перенося рабочую точку на входную характеристику транзистора, можно определить ее четвертый параметр — напряжение база—эмиттер $U_{BEp,T}$ (рис. 15.3). На этом же рисунке определены границы смещения a-b рабочей точки под действием входного сигнала, а также максимальное U_{BE2} и минимальное U_{BE1} напряжения на переходе база—эмиттер.

Теперь, зная параметры транзистора в рабочей точке, следует определить сопротивления резисторов базового делителя для обеспечения режима работы транзистора в рабочей точке.

Ток делителя $I_{\rm д}$ должен быть в 2—5 раз больше тока базы $I_{\rm Bp.T}$. Такой делитель позволяет получить достаточно стабильный при изменении температур каскад при одновременном выполнении требования экономичности.

На резисторе *R2* делителя должно действовать напряжение



$$U_{R_{\rm I}} = U_{BEp.T} + U_{R_4} \,. \tag{15.2}$$

Откуда

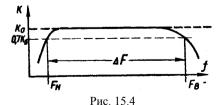
$$R_2 = \frac{U_{BEp,T} + U_{R_4}}{I_{\pi}} \,. \tag{15.3}$$

Тогда

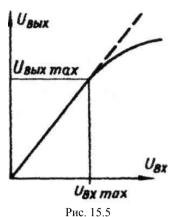
$$R_{1} = \frac{E_{C} - U_{BEp.T} - U_{R_{4}}}{I_{n}}.$$
 (15.4)

Одним из основных параметров УНЧ является амплитудно-

частотная характеристика (АЧХ), выражающая зависимость его коэффициента усиления K от частоты усиливаемого сигнала, которую снимают экспериментально (рис. 15.4).



I MC.



Кроме того, важна амплитудная характеристика УНЧ, выражающая зависимость выходного сигнала от входного (рис. 15.5).

Качественным показателем усилителя является искажение сигнала в процессе усиления — нелинейные искажения, которые измеряются специальными приборами — измерителями нелинейных искажений и выражаются коэффициентом нелинейных искажений:

$$k = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}} \cdot 100\%, \qquad (15.5)$$

где U_{m1} – амплитуда первой гармоники сигнала на выходе усилителя; U_{m2} , U_{m3} , ... – амплитуды второй и последующих гармоник (предполагается, что они отсутствуют во входном сигнале и появляются на выходе в результате искажений).

Измерителем нелинейных искажений стенд не располагает, поэтому в работе определяют лишь максимальное значение входного сигнала, при котором нелинейные искажения еще невелики (форма выходного сигнала на экране осциллографа не имеет заметных на глаз искажений). Максимальный входной сигнал $U_{\rm вx.max}$ определяют также по амплитудной характеристике усилителя, так как, начиная с этого значения, она отклоняется от прямой линии.

Задание

Экспериментально проверить упрощенный расчет элементов схемы определение основных параметров каскада резистивного усилителя напряжения низкой частоты на транзисторе (см. рис. 15.1).

Порядок выполнения работы

1. Вычертить табл. 15.1–15.3 режимов транзистора по постоянному току, снятия его амплитудно-частотной и амплитудной характеристик.

Таблица 15.1

Режим транзистора по постоянному току

Параметр транзистора в рабочей точке	Рассчитан- ный	Измеренный	После коррекции
I_B , мк A			
U_{BE} , B			
I_C , мк A			
U_{CE} , B			

Таблица 15.2

Амплитудно-частотная характеристика

Коэффициент		Частота <i>f</i> , кГц							
усиления К	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	5	20	50	100
Вариант 1									
Вариант 2									
Вариант 3									

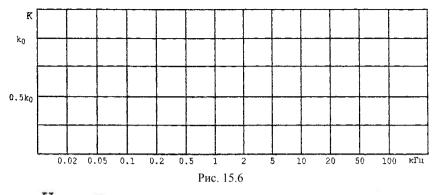
Таблица 15.3

Амплитудная характеристика

Выходное напряжение	Входное напряжение $U_{\text{вх}}$, мВ						
$U_{\scriptscriptstyle m BMX},{ m B}$	50	100	200	300	400	450	500
Вариант 1							
Вариант 2							

2. Вычертить координатные оси для построения графика амплитудно-частотной характеристики (рис. 15.6) и амплитудной характеристики (рис. 15.7).

Масштаб по осям: $U_{\rm bx}$ – в 1 см 40 мВ, $U_{\rm bbx}$ – в 1 см 0,5 В.



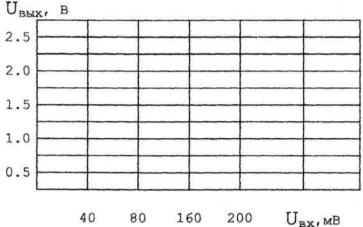


Рис. 15.7

- 3. Зарисовать электрическую схему исследуемого усилителя (см. рис. 8.1) и собрать ее, пользуясь графическими обозначениями на сменной панели 87Л-01/14.
- 4. Рассчитать сопротивления резисторов базового делителя и установить эти резисторы в схему.
- 5. Измерить параметры режима транзистора по постоянному току и занести результаты в табл. 15.1. В эту же таблицу занести расчетные параметры. Произвести коррекцию режима по постоянному току и занести в табл. 15.1 результаты.
 - 6. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя, за-

нося результаты измерений в табл. 152, и построить ее в координатных осях (см. рис. 15.6).

7. Снять амплитудную характеристику усилителя, занося результаты измерений в табл. 15.3, и построить ее в координатных осях (см. рис. 15.7).

Методические указания

1. При выполнении работы используют: $R_3 = 1$ кОм; $R_4 = 200$ Ом; $R_5 = 2$ кОм; $C_2 = 100$ мкФ; V1 — транзистор МП40.

 R_1 и R_2 рассчитывают по формулам (15.2)–(15.4).

Емкость конденсаторов С1, С3 и С4 задают в трех вариантах:

- 1) $C_1 = 0.1 \text{ MK}\Phi$; $C_3 = 10 \text{ MK}\Phi$; $C_4 = 0.01 \text{ MK}\Phi$;
- 2) $C_1 = 10 \text{ мк}\Phi$; $C_3 = 0.1 \text{ мк}\Phi$; $C_4 = 0.1 \text{ мк}\Phi$;
- 3) $C_1 = C_3 = 10$ мк Φ ; $C_4 = 0.01$ мк Φ .
- 2. После расчета сопротивлений резисторов R1 и R2 в схему устанавливают резисторы из комплекта съемных элементов стенда, близкие по сопротивлению к рассчитанным, причем оба резистора должны быть или больше, или меньше. В качестве корректирующего берут переменный резистор $R_1 = 22$ кОм.
- 3. Для расчета режима базовой цепи следует принять $E_C = 10 \text{ B}$, а напряжение на коллекторе транзистора установить равным 5 В. Измерения в схеме выполняют ABM2 (на пределах "10 В", "5 В", "1 В" и "0,5 В"). Ток базы $I_{\text{Вр.т.}}$ определяют по входной характеристике транзистора, снятой в работе № 11, а ток коллектора рассчитывают по формуле

$$I_{C_{\rm p.T}} = \frac{E_{C} - U_{CE{\rm p.T}}}{R_{3}} \; . \label{eq:cpt}$$

4. В качестве источника входного сигнала используют ГНЧ стенда, выходное напряжение которого измеряют ИВ (предел измерения 1 В эффективного значения). Частоту выходного сигнала измеряют ЧМ стенда, для чего переключатель ИВ устанавливают в положение "ЧМ", а тумблер "ЧМ-ГНЧ" – в положение "ГНЧ". Выходное напряжение усилителя измеряют осциллографом, а при напряжениях, меньше 1 Вэфф. – милливольтметром МВ стенда. Источник питания схемы – ГН стенда.

5. Снимают две амплитудные характеристики на частоте 1000 Γ ц для схемы по варианту 3; при снятии второй характеристики сопротивление резистора RI следует увеличить вдвое.

Контрольные вопросы

- 1. Что происходит с рабочей точкой при увеличении сопротивления резисторов *R1* и *R2*?
- 2. Какие элементы схемы влияют на AЧX в области нижних (верхних) частот?
- 3. Каковы пути расширения частотного диапазона усилителя в области нижних (верхних) частот?
- 4. Почему транзисторный каскад требует больших по номиналу разделительных конденсаторов C1 и C2 для получения одинаковых с ламповым усилителем AЧX в области нижних частот?
- 5. Как проявляют себя нелинейные искажения в процессе усиление синусоидальных сигналов?
 - 6. Для чего каскады согласуют по мощности?
 - 7. В каком режиме работает коллекторная цепь транзистора?
- 8. Как изменится усиление каскада, если исключить конденсатор C21?

Лабораторная работа 16

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И МОСТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: экспериментальное исследование дифференциальных и мостовых усилителей.

Теоретическая часть

Дифференциальные усилители (ДУ) находят применение в качестве масштабирующих преобразователей для датчиков с малым выходным сигналом в условиях сильных промышленных помех, например, термопар, тензометров сопротивлений, емкостных датчиков, датчиков биотоков и т.п. Простейшая схема ДУ изображена на рис. 16.1. Делитель напряжения на входе используется для того, чтобы коэффициенты усиления сигналов *U1* и *U2* сделать равными. Выходное напряжение определяется выражением:

$$U_0 = (U_2 - U_1)R_2/R_1$$
.

Схема на рис. 16.1 на одном ОУ находит достаточно широкое применение, хотя и обладает ОДНИМ недостатком, заключающимся в сравнительно низком входном сопротивлении. Если этот недостаток имеет существенное значение, то применяют схему, показанную на рис. 16.2, в которой он уст-

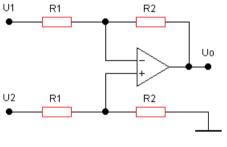
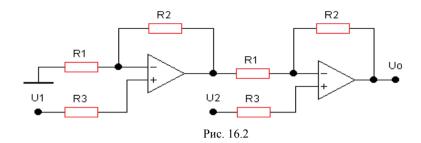


Рис. 16.1

ранен за счет использования двух ОУ. В этой схеме входное сопротивление ДУ равно входному сопротивлению ОУ. Выходное напряжение усилителя определяется выражением:

$$U_0 = (U_2 - U_1)(1 + R_2/R_1).$$

Сопротивление R3 выбирается из условия минимизации влияния паразитных входных токов усилителей; в первом приближении $R_3 = R_1 || R_2$.



Обычные схемы инвертирующего и неинвертирующего ДУ одинаково усиливают полезный сигнал и наведенные помехи, при этом ДУ значительно ослабляет синфазные помехи. Степень ослабления синфазных напряжений определяется коэффициентом $K_{\text{ос.сф}}$ ОУ.

Дифференциальные усилители, включенные в мостовую схему и преобразующие приращение сопротивления в напряжение, называются мостовыми. Такие усилители применяются при использовании датчиков, включаемых по мостовой схеме.

Различают мостовые усилители с нелинейной и линейной характеристиками. На рис. 16.3 показана схема мостового усилителя с нелинейной амплитудной характеристикой.

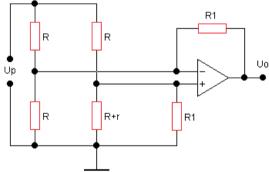


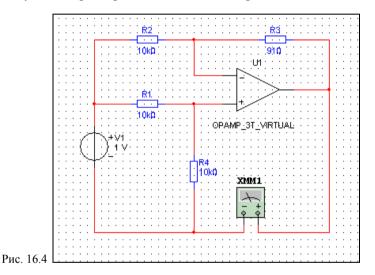
Рис. 16.3

Мостовая схема составлена из резисторов R и резистивного датчика R+R, где R — приращение сопротивления датчика в результате воздействия контролируемого параметра. В общем случае мост может состоять из комплексных сопротивлений в зависимости от типа датчика (емкостного, индуктивного или чисто рези-

стивного), а его питание осуществляется от источника $U_{\rm p}$ как постоянного, так и переменного тока. Выходное напряжение схемы на рис. 15.3 определяется выражением:

$$U_{0} = \frac{rU_{p}R_{1}}{R\left[R\left(2 + \frac{R}{R_{1}}\right) + r\left(1 + \frac{R}{R_{1}}\right)\right]}.$$
 (16.1)

Зависимость U_0 от R нелинейна, как и для любого неравновесного моста. Поэтому такая схема применяется только при малых относительных приращениях R/R. Мостовой усилитель с линейной амплитудной характеристикой показан на рис. 16.4.



Эта мостовая схема относится к классу линейных. Ее выходное напряжение определяется выражением:

$$U_0 = \frac{rU_p}{R(R+R_1)}. (16.2)$$

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- 2. Монитор.

- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

- 1. Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу ELECTRONICS WORKBENCH.
- 2. Открыть файл «Моделирование подавления сигнала синфазной помехи в ДУ.ms8»
- 3. Провести моделирование ДУ (рис. 16.5) при напряжении помехи в обоих каналах 5 В. Измерить напряжение помехи на выходе (выполняется при минимальном значении полезного сигнала, например 1 мкВ). Если результаты измерения не будут соответствовать данным расчета, объяснить причину (внимательно просмотреть список параметров выбранного ОУ, обратив особое внимание на значение $K_{\text{ос.сф}}$).

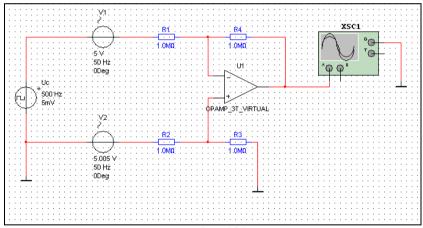


Рис. 16.5

В качестве примера оценим помехозащищенность схемы на рис. 16.3 при следующих значениях параметров:

- входной дифференциальный сигнал $U_2 U_1 = 10$ мВ (частота 500 Γ ц);
 - синфазная помеха $U_{\Pi} = U_2 = U_1 = 5 \text{ B}$ (частота 50 Γ ц);
 - примем типичное для ОУ значение $K_{\text{oc.c}, \phi} = 80 \text{ Дб} = 10000$;

- при указанных на схеме значениях сопротивления резисторов коэффициент усиления напряжения $K_{\nu}=1$;
 - для полезного сигнала получаем U_0 = 10 мB;
 - для синфазной помехи $U_0 = U_{\rm n} K_{\it u} / K_{{\rm oc.c} \phi}$ мВ.

Для моделирования процесса подавления синфазной помехи используем схему на рис. 9.5, в которой полезный сигнал формируется импульсным генератором (скважность сигнала равна 2, амплитуда импульса 10 мВ, подключение источника U_C к дифференциальным зажимам UI, U2 в программе EWB не допускается). Параметры напряжения помехи U_{Π} можно варьировать в широких пределах, в том числе менять и фазу, что часто встречается на практике, когда не удается полностью симметрировать токопроводящие провода. В предположении, что такая асимметрия имеет место, для ее имитации в верхнем источнике напряжение помехи увеличено на 5 мВ. Полученные при этом результаты измерений показаны на рис. 16.6.

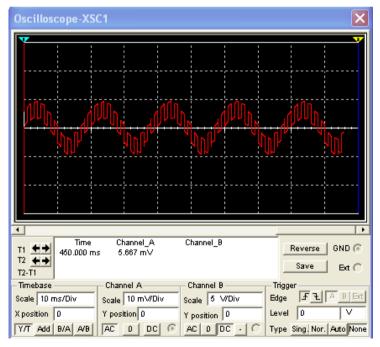


Рис. 16.6

Для схемы на рис. 16.3 с помощью формулы (16.1) рассчитайте зависимость $U_0 = F(R)$ при изменении R в диапазоне 0,01...0,5 кОм и затем проверьте моделированием при напряжении питания моста $U_{\rm p}=1$ В. Найдите ошибку, допущенную в этой схеме, сравнив ее со схемой на рис. 16.5.

После определения ошибки выберите такие сопротивления резисторов моста, чтобы они не оказывали существенного влияния на коэффициент передачи ДУ.

4. Проведите моделирование схемы «Мостовой усилит. с линейной ампл. характеристикой.ms8» на рис. 16.4 и проверьте справедливость выражения (16.2).

Откройте файл «Мостовой усилит. с линейной ампл. характеристикой.ms8» (рис. 16.7). Объясните, за счет чего в этой схеме обеспечивается линейная зависимость выходного напряжения от приращения сопротивления R.

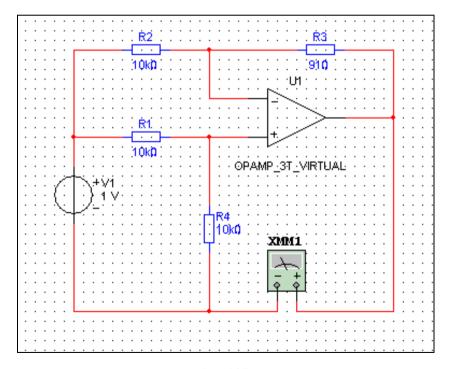


Рис. 16.7

Контрольные вопросы

- 1. Что такое синфазная помеха, как она проявляется в дифференциальном, инвертирующем и неинвертирующем усилителях?
- 2. Какая разница между дифференциальными и мостовыми усилителями?

Литература

- 1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на ІВМ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 2. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на ElectRonIcs WoRkbench. В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2. Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 5. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия-Телеком, 2007.

Лабораторная работа 17

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И КОМПАРАТОРА

Цель работы: изучение основных свойств и параметров операционных усилителей выполненных в виде интегральных микросхем, а также исследование важнейших типов усилительных схем, в которых они используются.

Теоретическая часть

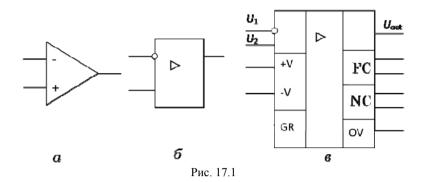
Основным «строительным материалом» в современной электронике являются интегральные микросхемы (ИС). Наиболее часто используемым усилителем, выполненным в виде ИС является операционный усилитель.

Операционный усилитель (ОУ) — это модульный многокаскадный усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами.

Ему присущи следующие характеристики:

- большой коэффициент усиления (от десятков до сотен тысяч);
 - широкая полоса пропускания от (10 г до 10 Мг);
 - высокое входное сопротивление;
 - низкое выходное сопротивление;
 - малый дрейф нуля;
 - высокая степень подавления синфазных сигналов;
 - несимметричный выход.

Условные обозначения ОУ приведены на рис. 17.1. Показанный усилитель имеет один выходной вывод и два входных. Знак ⊳ характеризует усиление. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на 180° относительно выходного напряжения, называется инвертирующим и обозначается знаком инверсии в виде окружности на соответствующем выводе.



На рис. 10.1, ε приведено полное условное графическое изображение ОУ. Для упрощения схем допускается изображение ОУ с указанием только информационных выводов (рис. 10.1, ε и ε).

Характерной особенностью операционного усилителя является то, что входные сигналы подаются относительно общей шины вместе с выходным сигналом. Для идеального усилителя при нулевых входных напряжениях выходной сигнал равен нулю. Благодаря этому свойству источники входного сигнала и нагрузку можно подключать непосредственно к выводам ОУ.

Довольно часто входные сигналы подаются на прямые входы, а инверсные используются для построения глубокой отрицательной обратной связи (OOC).

Назначение выводов : +V, -V — выводы подключения питания, GR — корпус, FC — выводы частотной коррекции, NC — выводы балансировки, OV — общий информационный вывод.

Чтобы обеспечить возможность работы ОУ как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, требуется двухполярное питающее напряжение. При двухполярном питании постоянное напряжение на выходе отсутствует при условии, что постоянных напряжений на входе ОУ нет.

Обычный ОУ состоит из следующих частей: дифференциального каскада, которых может быть несколько, схемы сдвига уровня и выходного каскада мощного усиления.

Основные характеристики ОУ. Можно выделить три группы параметров ОУ: входные, выходные и характеристики передачи. Рассмотрим некоторые из входных параметров.

Напряжение смещения $U_{\rm cm}$ определяет потенциал на выходе ОУ при нулевом входном сигнале, который поделен на коэффициент усиления усилителя. Значение $U_{\rm cm}$ не превышает десятков милливольт.

Cредний ток $I_{\rm BX}$ — среднее арифметическое значение постоянных токов инвертирующего и неинвертирующего входов в отсутствие сигнала. Обычно $I_{\rm BX}$ не превышает сотен наноампер.

Входное сопротивление. Следует различать дифференциальное входное сопротивление, т.е. сопротивление между входными выводами, и синфазное входное сопротивление, сопротивление между объединенными выводами входов и землей.

Температурные дрейфы напряжения смещения и токов характеризуют изменение соответствующих параметров с температурой и оцениваются в мкВ/градус и нА/градус соответственно.

В качестве выходных параметров ОУ рассмотрим две характеристики.

Bыходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ — внутреннее сопротивление выхода ОУ, о котором можно судить по напряжению на его выходе. Реальное $R_{\text{вых}}$ составляет единицы и сотни ом.

Максимальный выходной ток $I_{\text{тах вых}}$ – предельное значение выходного тока, которое может поступать в нагрузку.

Наибольший интерес представляют характеристики передачи.

 $Kоэ \phi \phi$ ициент усиления по напряжению K_u определяет коэффициент усиления усилителя без использования обратной связи. Для реальных ОУ равен нескольким тысячам.

Полоса пропускания – полоса частот, в которой K_u уменьшается не более чем на 0.707 ($\sqrt{2}$ раз) от своего максимального значение при неизменной амплитуде на входе.

Время установления выходного напряжения — время переходного процесса. Оценивается как промежуток времени с момента достижения уровня 0,1 до момента достижения уровня 0,9 установившегося значения выходного сигнала при подаче на вход прямоугольного импульса.

Время восстановления — время, необходимое для возврата ОУ из состояния насыщения по выходу в линейный режим. Для определения этого параметра первоначально на вход ОУ подают сигнал в два раза больший, чем необходимо для насыщения выходного каскада (режим 100 %-ной перегрузки). Измерение сводится к оп-

ределению времени после снятия входного напряжения до момента, когда $U_{\text{вых}}$ станет равно 0,1 от установившегося значения.

AXY определяет поведение ОУ при изменении частоты входного сигнала. Для ОУ среднего класса АЧХ имеет вид, представленный на рис. 17.2.

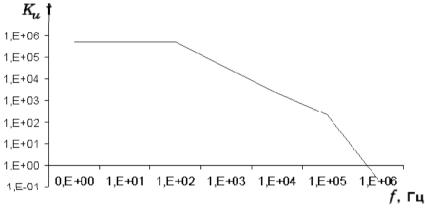


Рис. 17.2

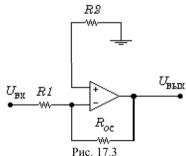
Применение ОУ. Для упрощения расчетов, рассматривая применение ОУ, будем считать, что:

- входы ОУ не потребляют ток;
- напряжение между входами усилителя равно 0;
- входное сопротивление усилителя величина бесконечно большая;
- коэффициент усиления по напряжению стремится к бесконечности.

Перечисленные условия описывают условия работы идеального усилителя.

Инвертирующий усилитель. ОУ охваченный цепью параллельной отрицательной обратной связи по напряжению носит название инвертирующего усилителя (рис. 17.3).

Входной сигнал подается на ин- Рис. 17.3 вертирующий вход. Неинвертирующий вход заземлен через *R*2,



153

сопротивление которого для снижения величины токового дрейфа равно

$$R_2 = R_{\text{oc}} \parallel R_1 = \frac{R_{\text{oc}} R_1}{(R_{\text{oc}} + R_1)}.$$

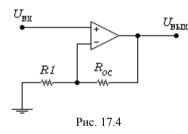
Выходное напряжение можно найти как падение напряжения на $R_{\rm oc}$ от тока $I_{\rm oc}$. В свою очередь, $I_{\rm oc}=I_{\rm Bx}$ (идеальный ОУ не поглощает тока).

$$\begin{split} I_{\text{bx}} &= \frac{U_{\text{bx}}}{R_{\text{l}}}; \quad I_{\text{oc}} = I_{\text{bx}} = \frac{U_{\text{bx}}}{R_{\text{l}}}; \\ U_{\text{bbix}} &= -R_{\text{oc}}I_{\text{oc}} = -\frac{U_{\text{bx}}R_{\text{oc}}}{R_{\text{c}}}. \end{split}$$

Тогда коэффициент усиления можно определить как

$$K_{\rm oc} = \frac{U_{\rm \tiny BMX}}{U_{\rm \tiny \tiny BY}} = -\frac{R_{\rm oc}}{R_{\rm \tiny I}} \ .$$

Неинвертирующий усилитель (рис. 17.4) представляет собой ОУ, охваченный цепью последовательной отрицательной связи по напряжению. Коэффициент усиления схемы жестко задается с помощью сопротивлений RI и $R_{\rm oc}$, которые образуют делитель напряжения с очень малой нагрузкой, в силу того, что ток, необходи-



мый для управления усилителем, $U_{\text{выж}}$ очень мал $(I_{\text{см}} \approx 0)$.

Входной сигнал подается на неинвертирующий вход. Выражение для коэффициента усиления этой схемы можно получить, используя условие равенства напряжений на входах ОУ и считая ОУ идеальным.

В этом случае коэффициент усиления с замкнутой обратной связью ($K_{\rm oc}$) равен $K_{\rm oc}=\frac{R_{\rm oc}}{R}+1$.

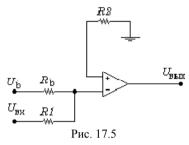
Компаратор. Сравнение напряжений часто используется для преобразования аналоговой информации в цифровую форму. Для этих целей выпускаются специализированные усилители, однако аналогичных результатов можно достигнуть и с помощью традиционного ОУ. При этом может быть использован как разомкнутый

усилитель без коррекции, так и усилитель с положительной обратной связью.

Если на вход $U_{\rm b}$ подать эталонное напряжение, а на второй вход схемы — синусоидальный сигнал, то выходное напряжение будет менять свою полярность при $U_{\rm b}=-U_{\rm bx}$, при условии что $R_{\rm b}=R_1$. Сопротивление R_2 выбирается из условия

$$R_2 = \frac{R_{\rm b} R_{\rm l}}{R_{\rm b} + R_{\rm l}} \, .$$

Выходное напряжение изменяется между своими предельными значениями со скоростью, которая зависит от скорости изменения напряжения источника сигнала $U_{\rm b}+U_{\rm bx}$, коэффициента усиления, полосы пропуска-



ния и скорости нарастания выходного напряжения. На рис. 17.5 показана схема компаратора, а на рис. 17.6 – осциллограмма выходного сигнала, которая определяется уровнем источника питания ОУ, а ширина импульсов – величиной эталонного напряжения.

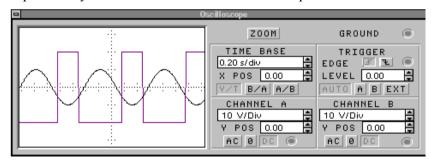


Рис. 17.6

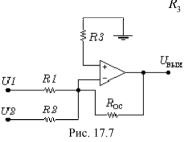
Инвертирующий сумматор. ОУ можно использовать для построения схем, выполняющих различные алгебраические операции. Инвертирующий сумматор формирует алгебраическую сумму нескольких переменных и меняет ее знак на противоположенный. На рис. 17.7 приведена схема, сигнал на выходе которой равен

$$U_{\text{вых}} = -(U_1K_1 + U_2K_2),$$

где
$$K_1 = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1}$$
 и $K_2 = \frac{R_{\text{oc}}}{R_2}$ — масштабирующие коэффициенты.

Значение сопротивления R3 определяется из соотношения:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{\rm oc}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \ .$$



R3

 $\mathcal{H}_{\mathrm{OC}}$

На рис. 17.7 показан инвертирующий сумматор с масштабирующими коэффициентами.

Неинвертирующий сумматор. Для выполнения простого суммирования, при котором знак суммы не будет меняться на противоположенный, может использоваться схема,

показанная на рис. 17.7:

RI

R2

R4

U1

U2

$$U_{\text{вых}} = U_1 K_1 + U_2 K_2,$$

 $U_{\rm BLDE}$

где
$$K_1 = \frac{R_3}{R_1}$$
 и $K_2 = \frac{R_3}{R_2}$ — масштаби-

рующие коэффициенты.

Обязательно соблюдение условия баланса:

$$\frac{R_{\hat{1}\,\hat{n}}}{R_4} = \frac{R_3}{R_1} + = \frac{R_3}{R_2} \ .$$

На рис. 17.8 показана схема неинвертирующего сумматора.

Рис. 17.9

Рис. 17.8

Схема сложения—вычитания. На практике часто требуется реализовать сложение нескольких величин, имеющих разные знаки. Для этого может использоваться обобщенный вариант предыдущей схемы, в которой положительные слагаемые подаются на неинвертирующий

вход усилителя, а отрицательные – на инверсный.

На рис. 17.9. показана схема сложения—вычитания, общее выражение для которой имеет следующий вид:

$$U_{\text{\tiny BMX}} = U_1 \frac{R_{\text{ocl}}}{R_1} + U_2 \frac{R_{\text{ocl}}}{R_2} - U_3 \frac{R_{\text{oc2}}}{R_3} - U_4 \frac{R_{\text{oc2}}}{R_4} \,.$$

Для правильной работы схемы необходимо, чтобы сумма коэффициентов усиления инвертирующей части схемы была равна сумме коэффициентов усиления ее неинвертирующей части. Иначе говоря, инвертирующий и неинвертирующий коэффициенты усиления должны быть сбалансированы:

$$\frac{R_{\text{ос.инв}}}{R_{\text{1}}} + \frac{R_{\text{ос.инв}}}{R_{\text{2}}} + \ldots + \frac{R_{\text{ос.инв}}}{R_{\text{n}}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_{\text{1}}^{\text{T}}} + \frac{R_{\text{oc}}}{R_{\text{2}}^{\text{T}}} + \ldots + \frac{R_{\text{oc}}}{R_{\text{n}}^{\text{n}}} \; ,$$

где n — число инвертирующих входов, а m — число неинвертирующих входов.

В случае строго заданных значений масштабирующих коэффициентов и номиналов используемых резисторов установить баланс в схеме можно, добавив к ней дополнительный вход, на который подается нулевой сигнал. Этот вход добавляется к той половине усилителя, суммарный коэффициент усиления которой меньше. Сопротивление на этом входе подбирается таким образом, чтобы сбалансировать схему.

Решение систем уравнений с помощью ОУ. Приведенные выше схемы сложения-вычитания могут использоваться для решения систем уравнений. Получаемые таким образом контуры применяются в автоматизированных управляющих системах, где требуется непрерывно формировать решение.

Рассмотрим решение системы уравнений на следующем примере.

Требуется решить систему уравнений относительно X и Y:

- a) X 3Y = 2;
- 6) 6X + 3Y = 60.

Решая уравнение а) относительно X, получим: X = 2 + 3Y. Решая уравнение б) относительно Y, получим: Y = 20 - 2X.

Построим первую схему, реализующую выражение X = 2 + 3Y (рис. 17.10). Для этого может использоваться схема неинвертирующего сумматора. Слагаемые 2 и Y подаются на неинвертирующий вход ОУ с коэффициентами усиления 1 и 3 соответственно.

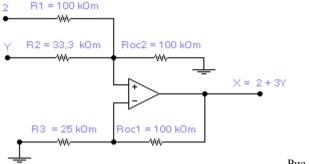


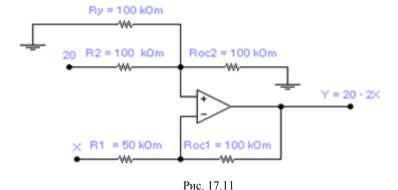
Рис. 17.10

Пусть сопротивления обратной связи $R_{\rm oc1}$ и $R_{\rm oc2}$ равны 100 кОм. Тогда сопротивление $R_2 = R_{\rm oc2} / 3 = 33,3$ кОм. Для выполнения условия баланса сопротивление R_3 должно удовлетворять следующему условию:

$$\frac{R_{\text{oc1}}}{R_3} = \frac{R_{\text{oc2}}}{R_1} + \frac{R_{\text{oc2}}}{R_2} \ .$$

Поэтому номинал сопротивления $R_3 = 25$ кОм.

Для формирования выражения Y = 20 - 2X можно использовать схему сложения-вычитания, в которой положительные слагаемые (20) будут подаваться на неинвертирующий вход ОУ, а отрицательные (-2X) – на инвертирующий (рис. 17.11).



Пусть сопротивления обратной связи $R_{\rm oc1}$ и $R_{\rm oc2}$ равны 100 кОм. Тогда сопротивление $R_1 = 50$ кОм, а $R_2 = 100$ кОм. Общий коэффи-

циент усиления по неинвертирующему входу меньше, чем общий коэффициент усиления по инвертирующему. Для выравнивания коэффициентов усиления необходимо ввести дополнительный резистор $R_{\rm v}=100~{\rm кOm}$.

Для решения исходной системы уравнений достаточно объединить соответствующие входы и выходы (рис. 17.12). Решение системы уравнений можно получить с соответствующих выходов схемы X и Y.

Примечание. В приведенных выше схемах используются идеальные ОУ. На практике выходное напряжение ОУ не может превышать определенного диапазона. При построении реальных управляющих систем требуется определить масштаб вычислений, в котором могут быть представлены все возможные ответы. Например, если выходное напряжение используемого ОУ может изменяться в диапазоне ± 15 В, а входные значения X и Y не превышают 150, то можно выбрать масштаб 0,1 B = 1.

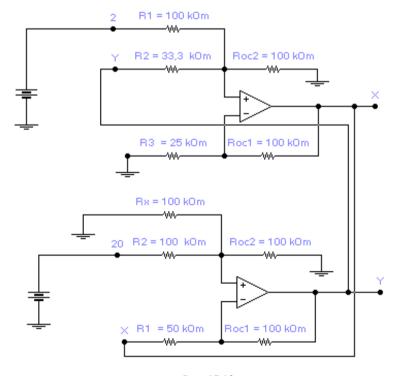


Рис. 17.12

Приборы и оборудование

- 1. Системный блок.
- 2. Монитор.
- 3. Принтер.
- 4. Программа Multisim 8 Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа состоит из нескольких этапов. Перед началом необходимо получить у преподавателя задания.

При использовании для исследования характеристик ОУ с помощью программы Electronics Workbench рекомендуется использовать ОУ 3554AM.

Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу ELECTRONICS WORKBENCH.

І. Исследование инвертирующего усилителя.

1. Для работы необходимо загрузить схему исследования. <Схема инвертирующего OУ.ms8>, нажав кнопку « Открыть». Откроется схема инвертирующего усилителя, изображенная на рис. 17.13.

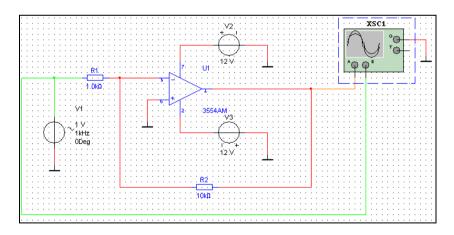


Рис. 17.13

2. Подать на вход схемы синусоидальный сигнал с амплитудой 1 В и частотой 50 Гц. Снять выходную характеристику по диаграмме работы инвертирующего ОУ (рис. 17.14).

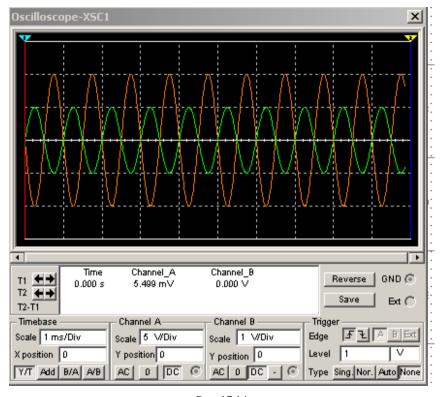


Рис. 17.14

- 3. Установить частоту входного сигнала 10 КГц и определить амплитуду входного сигнала, при которой форма выходного сигнала начинает искажаться.
- 4. Снять АХЧ ОУ 3554АМ в диапазоне частот от 10 Гц до частоты единичного усиления. Построить АЧХ. Определить по АЧХ полосу пропускания.
- 5. Подать на вход прямоугольный сигнал с амплитудой 10 В и частотой 10 Гц. Определить время установления выходного напряжения.

II. Исследование неинвертирующего усилителя.

1. Для работы необходимо загрузить схему исследования. <Схема неинвертирующего OУ.ms8> нажав кнопку «Открыть».

Откроется схема неинвертирующего усилителя, изображенная на рис. 17.15.

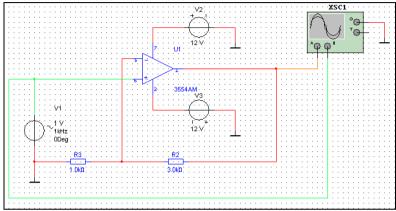


Рис. 17.15

2. Подать на вход схемы синусоидальный сигнал с амплитудой 2 В и частотой 50 Гц. Снять выходную характеристику (рис. 17.16).

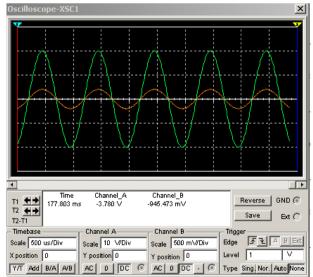


Рис. 17.16

- 3. Установить частоту входного сигнала 10 КГц и определите амплитуду входного сигнала, при которой форма выходного сигнала начинает искажаться.
- 4. Снимите амплитудно-частотную характеристику ОУ 3554AM в диапазоне частот от 10 Гц до частоты единичного усиления. Постройте АЧХ в логарифмических координатах. Определите по ЛАЧХ полосу пропускания.
- 5. Подайте на вход прямоугольный сигнал с амплитудой 10 В и частотой 10 Гц. Определите время установления выходного напряжения.

III. Исследование компаратора.

1. Для работы необходимо загрузить схему исследования <Схема компаратор.ms8>, нажав кнопку « Открыть».

Откроется схема компаратора изображенная на рис. 17.17, выполняющая сравнение входного синусоидального сигнала с амплитудой $U_{\rm BX}$ с эталонным напряжением $U_{\rm b}$.

- 1)Снимите выходную характеристику. Определите амплитуду выходного сигнала.
- 2) Изменяя величину эталонного напряжения, получите на выходе прямоугольный сигнал с одинаковой длительностью отрицательного и положительного полупериодов.

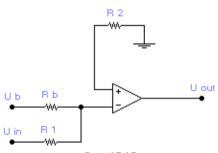


Рис. 17.17

Контрольные вопросы

- 1. Определение и назначение ОУ.
- 2. Назначение интегратора и диффференциатора.
- 3. Назначение компаратора.

Литература

1. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере. М.: Горячая линия – Телеком, 2003.

- 2. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на *I*ВМ РС. М.: Солон-Р, 1999.
- 3. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на ElectRonIcs WoRkbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова. Т.2: Электроника. М.: ДОДЭКА, 2000.
- 4. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. М.: Высшая школа, 1998.
- 5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978.
- 6. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М.: Горячая линия Телеком, 2007.

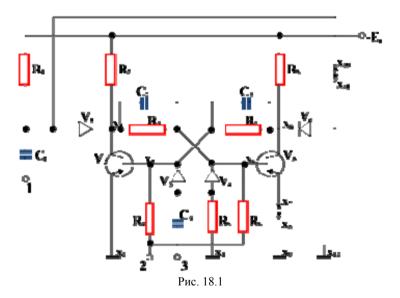
Лабораторная работа 18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРА

Цель работы: изучение принципа действия симметричного триггера со счетным входом в режиме деления частоты.

Теоретическая часть

Триггером называется устройство с двумя устойчивыми состояниями (рис. 18.1). Понятие устойчивого состояния в импульсной технике означает, что схема может находиться в определенном электрическом состоянии сколь угодно долго и выводится из него только под действием внешнего сигнала, например импульса.



Свойство триггера запоминать определенное устойчивое состояние позволяет применять его как устройство памяти. Триггеры широко используются также для деления частоты импульсной последовательности. Каждый триггер делит частоту вдвое, а следовательно, n последовательно включенных триггеров делят частоту в 2^n раз.

Устойчивое состояние триггера характеризуется следующими режимами работы его транзисторов: когда один из транзисторов открыт, напряжение на его коллекторе близко к нулю, а напряжение на базе отрицательное, другой транзистор закрыт, напряжение на его коллекторе близко к E_{C} , а напряжение на базе положительное.

Рассмотрим подробнее устойчивое состояние триггера и процесс его перехода из одного устойчивого состояния в другое.

Пусть транзистор R_2 открыт, а транзистор R_5 закрыт. Открытое состояние транзистора R_2 обеспечивается достаточным для его насыщения током базы, который является суммой двух токов: отпирающего от источника коллекторного питания E_C и запирающего от источника смещения плюс $E_{\rm cm}$. Отпирающий ток проходит по цепи: плюс E_C (корпус), эмиттер—база V_2 , R_7 , R_8 , минус E_C . Запирающий ток проходит по цепи: плюс $E_{\rm cm}$, R_4 , база—эмиттер V_2 , корпус минус $E_{\rm cm}$. Открытое состояние транзистора V_2 возможно только в том случае, если транзистор V_5 закрыт. Транзистор V_5 закрыт положительным напряжением на его базе, которое поступает с делителя R_6 – R_3 от источника $+E_{\rm cm}$. Очевидно, что только при насыщенном транзисторе V_2 возможно положительное напряжение на базе V_5 и, следовательно, закрытое его состояние. В этом состоянии схема может находиться сколь угодно долго.

Для переключения триггера в другое устойчивое состояние необходимо воздействовать на него одним из трех способов:

- ullet подать на базу транзистора V_2 импульс положительной полярности, который его закроет, вследствие чего откроется транзистор V_5 ;
- подать на базу транзистора V_5 импульс отрицательной полярности, который его откроет, вследствие чего закроется транзистор V_2 ;
- подать одновременно положительный импульс на базу транзистора V_2 и отрицательный на базу транзистора V_5 .

Пусть на базу транзистора V_2 поступит положительный импульс, достаточный по амплитуде для его закрытия. На коллекторе транзистора V_2 появится перепад напряжения отрицательной полярности, который через конденсатор C_2 поступит на базу транзистора V_5 в виде короткого импульса отрицательной полярности и откроет его. Напряжение на коллекторе V_5 уменьшится, что приве-

дет к уменьшению отпирающего тока базы транзистора V_2 и еще большему увеличению напряжения на его коллекторе. Процесс происходит лавинообразно и завершается переключением схемы в новое устойчивое состояние.

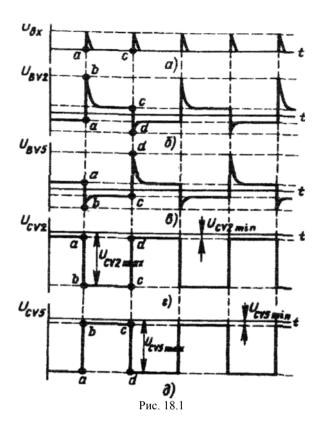
Аналогично на схему действует отрицательный импульс, поступающий на базу транзистора V_5 , который открывает его, напряжение коллектора этого транзистора уменьшается. Положительный импульс передается через конденсатор C_4 на базу транзистора V_2 и закрывает его, Закрытию транзистора V_2 способствует также заряд ускоряющего конденсатора C_4 (пластина которого, соединенная с базой транзистора V_2 , заряжена положительно). Заряженный конденсатор C_4 через открывшийся транзистор V_5 подключается к переходу база — эмиттер транзистора V_2 .

В данной работе исследуется триггер со счетным запуском: на общий вход 1 или 3 поступают импульсы положительной полярности, каждый из которых вызывает переключение триггера. Так работают триггеры в делителях частоты.

При коллекторном запуске элементами схемы запуска являются: конденсатор C_1 , разделяющий по постоянному току генератор запускающих импульсов и триггер; резистор R_1 , позволяющий конденсатору C_1 разряжаться и фиксирующий потенциалы р- области диодов V_1 и V_6 , диоды V_1 и V_6 , пропускающие импульс запуска только на коллектор закрытого транзистора и далее через ускоряющий конденсатор C_2 или C_4 на базу открытого транзистора, вследствие чего открытый транзистор триггера закрывается.

Временные диаграммы процессов, происходящих в триггере при его работе в режиме деления частоты, показаны на рис. 18.2.

Пусть к моменту a (см. рис. 18.1) прихода импульса запуска транзистор V_2 открыт, а транзистор V_5 закрыт. Диод V_1 закрыт напряжением, близким к минус, так как на его p-область через резистор RI поступает напряжение минус E_C , а потенциал n-области близок нулю. Следовательно, входной импульс, амплитуда которого меньше E_C , через диод V_1 не пройдет. Диод V_6 также закрыт, но значительно меньшим напряжением, равным падению напряжения на резисторе R_8 от тока делителя $R_7 - R_8$. Обычно $R_7 >> R_8$, поэтому $U_{P8} << E_C$.



Чтобы входной импульс прошел через диод V_6 , его амплитуда должна быть больше U_{R8} . Этот импульс через конденсатор C_4 поступает на базу транзистора V_2 , закрывает его и напряжение на коллекторе увеличивается. Перепад этого напряжения в виде импульса отрицательной полярности через конденсатор C_2 поступает на базу транзистора V_5 и открывает его. К моменту в опрокидывание схемы завершается. Выброс положительного напряжения на базе транзистора V_2 в момент в связан с подключением к базе этого транзистора дополнительного положительного напряжения заряженного конденсатора C_4 через открытый транзистор V_5 . Спадающее по экспорте после момента в напряжение базе транзистора V_2 свидетельствует о разряде этого конденсатора через резистор R_7 . К моменту прихода следующего запускающего импульса диод V_6 оказывается закрытым напряжением, близким к E_C , а диод V_1 зна-

чительно меньшим напряжением U_{R2} . Поэтому импульс запуска проходит только через диод V_1 конденсатор C_2 на базу открытого транзистора V_5 и закрывает его. Транзистор V_2 открывается отрицательным импульсом, поступающим на базу с коллектора транзистора V_b (точки с и d на временных диаграммах). Небольшой выброс отрицательного напряжения в момент d на базе транзистора V_2 и последующий его спад по экспоненте свидетельствуют о заряде конденсатора C_4 базовым током транзистора V_2 .

Таким образом, каждый очередной импульс запуска воздействует только на тот транзистор, на который следовало бы подать импульс для опрокидывания триггера в режиме раздельного запуска.

При базовом запуске дополнительно включают следующие элементы: конденсатор C_3 , диоды V_3 и V_4 , резистор R_5 (цепи коллекторного запуска при этом отключают). Назначение этих элементов то же, что и в схеме коллекторного запуска. Отличие состоит в том, что небольшим положительным напряжением закрыт только один из диодов (тот, который подключен к базе закрытого транзистора), а другой открыт, хотя прямой ток через него невелик, так как невелико отпирающее напряжение – напряжение на переходе база-эмиттер открытого транзистора. Запускающие импульсы при этом варианте схемы могут иметь значительно меньшую амплитуду, что подтверждается экспериментально – схема коллекторного запуска работает только при пониженном примерно до 5 В напряжении коллекторного источника E_{C} и максимальной амплитуде запускающих импульсов от ГПИ, тогда как схема базового запуска работает вполне устойчиво при любом напряжении питания (выходное напряжение ГН2 лежит в пределах от 1 до 15 В) и значительно меньшей амплитуде импульсов запуска.

Схеме базового запуска присущ следующий недостаток: длительность и амплитуда входного импульса влияют на параметры выходного напряжения. Так, при повышенной длительности импульса запуска переходные процессы в схеме приводят к затягиванию положительного фронта выходного напряжения. При слишком коротких запускающих импульсах схема может вообще не опрокидываться, так как переходные процессы в ней не будут завершаться полностью. При большой амплитуде входных импульсов возможно

их проникновение на выход схемы в виде короткого импульса положительной полярности, предшествующего положительному фронту выходного напряжения.

Частотные свойства триггеров, т.е. их способность надежно работать на высоких частотах, определяются частотными свойствами транзисторов и весьма сложными процессами закрывания открытого и насыщенного транзистора. Повышение рабочей частоты, на которой триггер уверенно работает, происходит при снижении степени насыщения транзисторов, а также в схемах, где транзисторы не насышены.

Наиболее часто триггеры используют в делителях частоты. Процесс деления на ДВА состоит в следующем: входная импульсная последовательность приводит к появлению на выходе триггера импульсного напряжения со скважностью 2. После дифференцирования такого напряжения частота положительных импульсов, равная частоте появления положительных перепадов напряжения, оказывается вдвое меньшей частоты импульсов запуска.

Задание

Исследовать принцип действия симметричного триггера со счетным входом в режиме деления частоты (см. рис. 18.1).

Порядок выполнения работы

1. Сделать таблицу для записи напряжений на выводах транзисторов триггера в статическом режиме (табл. 18.1).

Таблица 18.1

Транзистор	V2		V5	
Вывод	Коллектор	База	Коллектор	База
Напряжение, В				
Состояние				

Напряжения на выводах транзисторов в статическом режиме

Примечание. В графе «Состояние» для открытого транзистора запись "Открыт", а для закрытого — "Закрыт".

2. Сделать таблицу для записи средних значений напряжений на выводах транзисторов триггера, работающего в режиме деления частоты (табл. 18.2).

Таблица 18.2

Средние значения напряжений на выводах транзисторов триггера

Транзистор	V2		V5	
Вывод	Коллектор	База	Коллектор	База
Напряжение, В				
Состояние				

- 3. Зарисовать электрическую схему исследуемого триггера (см. рис. 18.1).
- 4. Собрать схему триггера без цепей запуска, пользуясь графическими значениями на сменной панели (87Л-01/28), убедиться в устойчивости двух его состояний, измерить постоянные напряжения на выводах транзисторов и занести результаты в табл. 18.1, указав знак напряжения относительно корпуса.
- 5. Собрать схему коллекторного запуска, наблюдать работу триггера в режиме деления частоты, измерить параметры запускающих импульсов и напряжение коллекторного питания, при котором триггер работает устойчиво. Построить осциллограммы в едином масштабе времени относительно линий нулевого потенциала.
- 6. Собрать схему базового запуска, наблюдать работу триггера в режиме деления частоты во всем диапазоне работы ГПИ, построить осциллограмму выходного напряжения при частоте запускающих импульсов 100 кГц.
- 7. Измерить постоянные составляющие напряжений на выводах транзисторов триггера при его работе в режиме деления частоты и занести результаты в табл. 18.2, указав знак измеренного напряжения относительно корпуса.

Методические указания

1. При выполнении работы используют:

$$R_1 = R_5 = 51 \text{ kOm};$$
 $R_2 = R_8 = 2 \text{ kOm};$

$$R_3 = R_7 = 12 \text{ kOm};$$
 $R_4 = R_6 = 8,2 \text{ kOm};$ $C_2 = C_4 = 510 \text{ m}$; $C_1 = C_3 = 0.01 \text{ mk}$ Ф;

- V1 и V6 диоды КД103A (эти же диоды используют в схеме базового запуска V3 и V4); V2 и V5 транзисторы МП40; две перемычки.
- 2. Устанавливают на выходе ГН2 напряжение 10 В, для измерения которого переводят переключатель ИВ стенда в положение "25 В ГН2". Зажим ГН2 "—" подключают к гнезду - E_C исследуемой схемы, а зажим "+" к гнезду X12.
- 3. Для измерения постоянных напряжений на выводах транзисторов используют ABM1 на пределах "10 B", "5 B", "2,5B" и "1 B", зажим ABM1 "-" подключают к гнездам XI, X3, X5 и X6, а зажим "+" к гнезду X9, При измерении положительного напряжения на базе закрытого транзистора зажим ABM1 "+" подключают к базе транзистора (гнездо X3 или X5), а "-" к гнезду X9.
- 4. Уменьшают выходное напряжение ГН2 до 5 В и собирают схему коллекторного запуска, установив съемные элементы R_1 , C_1 , V_1 и V_6 .
- 5. Устанавливают переключатель ГНЧ "Диапазон" в положение "1 кГц", переключатель ГПИ "Диапазон" в положение "100 кГц", тумблер "ЧМ ГНЧ" в положение "ГНЧ", переключатель ИВ в положение "ЧМ", а переключатель ЧМ в положение "5 кГц". Вращая регулятор ГНЧ "Частота", устанавливают на выходе ГПИ по ЧМ стенда частоту 1 кГц, затем поворачивают регулятор ГПИ "Длительность" против часовой стрелки до упора, что соответствует минимальной длительности выходных импульсов, а регулятор "Амплитуда" по часовой стрелке до упора, что соответствует максимальной амплитуде выходных импульсов. Зажим ГПИ «П» подключают к гнезду 1 исследуемого триггера, а зажим «⊥» к гнезду X2.
- 6. Открытый вход осциллографа подключают к гнездам XI, X3, X5 и X6, а вывод « \bot » к гнезду X4.
- 7. Для измерения постоянных составляющих напряжений на выводах транзисторов используют ABM1 на пределах, указанных в п. 3.
- 8. Для исследования базовой схемы запуска элементы коллекторного запуска переносят в базовые цепи транзисторов, а зажим ГПИ «П» переключают в гнездо 3.

Контрольные вопросы

- 1. Поясните временными диаграммами процесс деления частоты с помощью триггера.
- 2. Каково значение ускоряющих конденсаторов в схеме триггера при коллекторном запуске?
 - 3. Почему каждое из двух состояний триггера устойчиво?
- 4. Чем определяется длительность импульсов на выходе триггера?
 - 5. Каково назначение источника смещения?

Лабораторная работа 19

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МУЛЬТИВИБРАТОРА

Цель работы: изучение принципа действия мультивибратора, работающего в автоколебательном режиме, наблюдение его работы в режиме синхронизации и деления частоты.

Теоретическая часть

Мультивибратор представляет собой генератор релаксационных (разрывных) колебаний и предназначен для получения импульсов напряжения, форма которых близка к прямоугольной, а скважность невелика и обычно лежит в пределах от 2 до 20.

Характерной особенностью релаксационных генераторов является чередование интервалов времени их работы, когда выходное напряжение постоянно или медленно изменяется, с моментами лавинообразного и весьма быстрого его изменения – перепадами. На осциллограммах эти перепады напряжения наблюдаются как разрывы (отсюда название таких схем – релаксационные). Спектральный состав колебаний мультивибратора сложен: кроме основной частоты он содержит множество гармоник.

Этим объясняется термин "Мультивибратор" – генератор для получения множества колебаний.

По схеме (рис. 19.1) мультивибратор является двухкаскадным резистивным усилителем, в котором выход одного каскада (коллектор транзистора V_1 или V_2) связан через разделительный конденсатор (C_2 или C_4) с входом другого (база транзистора V_2 или V_1). Каждая такая обратная связь для остального усилителя является положительной с коэффициентом передачи, близким к единице. Так, если на базе транзистора V_1 появляется положительный перепад напряжения, это приводит к появлению на коллекторе этого транзистора отрицательного перепада напряжения. Отрицательный перепад напряжения с коллектора транзистора V_1 через конденсатор C_2 передается в виде отрицательного импульса на базу транзистора V_2 , на коллекторе которого появляется положительный импульс.

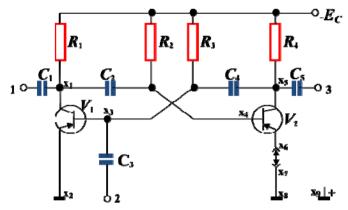


Рис. 19.1

С коллектора транзистора V_2 этот импульс через конденсатор C_4 возвращается на базу транзистора в фазе с первичным перепадом напряжения. Следовательно, обратная связь (для рассмотренного случая цепью ПОС служит конденсатор C_4) является положительной. Таким образом, в схеме мультивибратора выполняется условие баланса фаз.

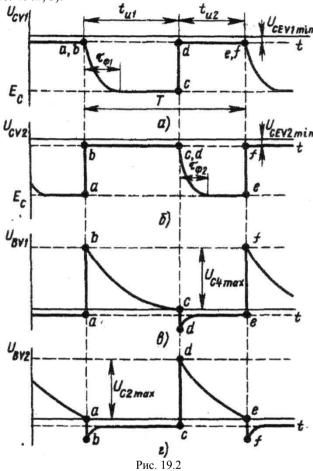
Коэффициент передачи цепи обратной связи близок к единице, так как сопротивление конденсатора C_4 при быстром изменении напряжения на нем близко к нулю и импульс напряжения с выхода схемы (коллектор транзистора V_2) полностью передается на ее вход (база транзистора V_1). Поэтому условие баланса амплитуд выполняется практики в любом случае, ведь усиление на каскад в схеме должно быть для ее возбуждения немногим больше единицы, что легко достижимо.

Рассмотрим работу мультивибратора в автоколебательном режиме, начиная с момента, показанного на рис. 19.2, *а.* Доказав, что состояние а через определенный промежуток времени повторится, убедимся в существовании автоколебательного процесса.

- В момент а транзистор V_1 открыт и насыщен, напряжение на его коллекторе мало и равно U_{CEVImin} ; (рис. 19.2, a);
 - конденсатор C_2 разрядился почти до нуля;
- конденсатор C_4 заряжен почти до E_C , причем его пластина, подключенная к базе транзистора V_1 , заряжена положительно;
 - транзистор V_2 закрыт и напряжение на его коллекторе близ-

ко к E_C (рис. 19.2, δ), а напряжение на базе транзистора V_2 равно

нулю (рис. 19.2, г).



Сразу же после момента а напряжение на базе транзистора V2 становится отрицательным, так как завершается разряд конденсатора C2, появляется базовый ток транзистора V_2 , который начинает открываться, и напряжение на его коллекторе уменьшается из-за падения напряжения на резисторе R4. Транзистор V_1 при этом начинает закрываться, так как напряжение на его базе уменьшается из-за уменьшения напряжения на коллекторе транзистора V_2 (рис.

19.2, в). Напряжение на коллекторе транзистора V_1 увеличивается, что приводит к увеличению напряжения на базе транзистора V_2 и увеличению его базового тока по цепи: плюс E_C (корпус), эмиттербаза транзистора V_2 , параллельно включенные резисторы R_1 и R_2 (так как конденсатор C_2 разряжен), минус E_C . Затем транзистор V_2 открывается, а транзистор V_1 закрывается, так как к его эмиттерному переходу подключается заряженный конденсатор C_4 через открытый транзистор V_2 .

Процесс переключения транзисторов в новое временно устойчивое состояние происходит весьма быстро — лавинообразно и завершается в точке b временной диаграммы.

В интервале времени bc в схеме происходят следующие процессы:

- напряжение на коллекторе транзистора V_1 сначала увеличивается по экспоненте, так как ток заряда конденсатора C_2 создает падение напряжения на резисторе R_1 , а затем по окончании заряда конденсатора C_2 достигает значения, близкого к E_C ;
- напряжение на коллекторе транзистора V_2 мало и равно напряжению насыщения $U_{\it CEV2min}$;
- напряжение на базе транзистора V_1 положительное и уменьшается по экспоненте, так как конденсатор C_4 разряжается по цепи: положительно заряженная пластина C_4 , резистор R_3 , минус Ее, плюс E_C (корпус), эмиттер—коллектор транзистора V_2 , отрицательно заряженная пластина C_4 ;
- напряжение на базе транзистора V_2 сначала увеличивается (точка b рис. 19.2, ε), а затем несколько уменьшается по экспоненте (выброс и экспоненциальный спад напряжения объясняются тем, что ток заряда конденсатора C_2 через переход эмиттер—база транзистора V_2 сразу же после момента а близок к току коллектора транзистора V_2 в режиме насыщения, а затем по мере заряда конденсатора C_2 этот ток уменьшается по экспоненте и одновременно уменьшается напряжение на эмиттерном переходе транзистора V_2);
- по окончании заряда конденсатор C_2 в цепи базы транзистора V_2 устанавливается ток, определяемый сопротивлением резистора R_2 и достаточный для открывают транзистора V_2 .

В момент c конденсатор C_4 разряжается до нуля и начинается переход (опрокидывание) схемы в первое временно устойчивое состояние:

- появляются токи базы и коллектора транзистора V_1 , уменьшается напряжение на его коллекторе и, наконец, он открывается (точка d);
- заряженный почти до E_C конденсатор C_2 через открытый транзистор V_1 подключается к эмиттерному переходу транзистора V_2 , что приводит к его закрытию и началу заряда конденсатора C_4 током базы транзистора V_1 ; транзистор V_2 находится в закрытом состоянии до тех пор, пока конденсатор C_2 не разрядится до нуля и схема не опрокинется в очередной раз.

Таким образом, начав рассматривать процесс с момента a, мы пришли к совершенно аналогичному моменту e, доказав, что в схеме мультивибратора происходит генерация периодических импульсов напряжения.

Длительность интервалов времени рассчитывают по формулам

$$t_{\rm W1} \approx 0.7 R_3 C_4,\tag{19.1}$$

$$t_{\rm H2} \approx 0.7 R_2 C_2,\tag{19.2}$$

откуда период и частота следования импульсов на выходе мультивибратора

$$T \approx 0.7(R_2C_2 + R_3C_4),$$
 (19.3)

$$f \approx 1/T \approx 1/[0.7(R_2C_2 + R_3C_4)],$$
 (19.4)

Может быть, что номиналы времязадающих элементов одинаковы, т.е. $R_2 = R_3 = R$ и $C_2 - C_4 = C$. В этом случае мультивибратор генерирует импульсы напряжения со "скважностью" 2 (период следования вдвое больше длительности импульса). Такой мультивибратор называют симметричным, его временные параметры определяют по формулам

$$t_{\text{H}1} \approx 0.7RC,\tag{19.5}$$

$$T \approx 1,4RC,\tag{19.6}$$

$$f \approx 1/T \approx 1/1,4RC. \tag{19.7}$$

Скважность импульсной последовательности определяется как отношение периода T следования импульсов к длительности $\tau_{\rm u}$ импульса:

$$Q = T/\tau_{\text{\tiny H}}.\tag{19.8}$$

Длительности фронтов отрицательных перепадов на коллекторах транзисторов определяют по формулам:

$$\tau_{\phi 1} = 2.3R_1C_2, \quad \tau_{\phi 1} = 2.3R_4C_4.$$
 (19.9)

Если необходимо, работу мультивибратора синхронизируют, для чего режим свободных колебаний переводят в режим принудительных колебаний, частота которых определяется не параметрами задающих время цепей, а частотой следования синхронизирующих импульсов, поступающих от внешнего генератора. При синхронизации частоты (рис. 19.3) импульсы отрицательной полярности, частота которых несколько выше частоты свободных колебаний мультивибратора, поступают на базу транзистора V_1 . Если бы схема работала в обычном автоколебательном режиме, транзистор V_1 открывался бы в момент b

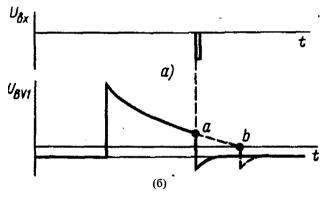
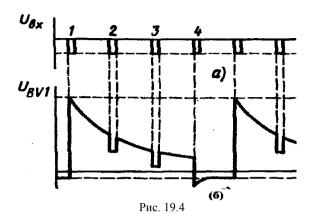


Рис. 19.3

Однако синхроимпульс открывает транзистор V_1 несколько раньше — в момент a. Под действием этого импульса схема переходит во второе временно устойчивое состояние (транзистор V_1 открыт, а транзистор V_2 закрыт), продолжительность которого определяется параметрами цепи R_2C_2 . Затем схема возвращается в первое временно устойчивое состояние, когда транзистор V_1 закрыт, а транзистор V_2 открыт. Очередной импульс синхронизации приводит к повторению этого процесса.

Аналогично с помощью мультивибратора происходит процесс деления частоты импульсной последовательности (рис. 19.4). При этом синхронизация мультивибратора осуществляется каждым вторым, третьим и т.д. синхроимпульсом и частота его колебаний будет вдвое, втрое и т.д. меньше частоты синхроимпульсов, т.е. он будет работать в режиме деления частоты.



Задание

На основе схемы рис. 19.1 исследовать принцип действия мультивибратора, работающего в автоколебательном режиме, наблюдение его работы в режиме синхронизации и деления частоты.

Порядок выполнения работы

1. Начертить таблицы для записи результатов измерений, расчетов и режимов (табл. 19.1 и 19.2).

Таблица 19.1

Емкость конденсаторов	$C_2 = C_4$	1000	0,01	0,1
		пΦ	мкФ	мкФ
Сопротивление рези-	$R_2 = R_3$			
сторов, кОм				
Период следования им-	Измеренный			
пульсов Т, МКС	Расчетный			
Период следования им-	Измеренный			
пульсов f , к Γ ц	Расчетный			

Таблица 19.2

Гнездо	x_1	x_3	x_4	x_5	$-E_C$
Напряжение, В					

- 2. Нарисовать электрическую схему исследуемого мультивибратора (см. рис. 19.1) и собрать ее, пользуясь графическими обозначениями на сменной панели (87Л-01/27).
- 3. Измерить временные параметры выходного напряжения мультивибратора для номиналов элементов схемы, приведенных в таблице 1, и занести результаты в эту таблицу. Рассчитать эти параметры, пользуясь формулами (19.6) и (19.7), занести результаты в табл. 19.1 и сравнить их с измеренными.
- 4. Измерить постоянные составляющие напряжений на выводах транзисторов мультивибратора в автоколебательном режиме и занести результаты табл. 19.2.
- 5. Наблюдать и зарисовать осциллограммы напряжений в гнездах x_1 , x_3 , x_5 , 3. Указать на осциллограммах горизонтальными линиями уровни постоянных составляющих напряжений.
- 6. Наблюдать работу мультивибратора в режимах синхронизации и деления частоты. Зарисовать осциллограммы напряжений на базах транзисторов в едином масштабе времени. Убедиться, что изменение параметров времязадающих цепей схемы в определенных пределах не выводит мультивибратор из режима синхронизации.

Методические указания

1. При выполнении работы используют:

 $R_1 = R_4 = 2 \text{ kOm};$

 $R_2 = 51, 33$ и 100 кОм (переменный);

 $R_3 = 51$ и 33 кОм;

 $C_1 = C_3 = 0,022$ мк Φ ;

 $C_2 = C_4 = 1000 \text{ пФ}, 0,01 \text{ и } 0,1 \text{ мкФ};$

 $C_5 = 0.033$ мкФ;

 V_1 и V_2 – транзисторы МП40;

перемычку.

- 2. Устанавливают на выходе ГН по ИВ стенда напряжение 10 В, для измерения которого переводят переключатель ИВ в положение "25 В ГН". Зажим ГН "—" подключают к гнезду " $E_{\rm C}$ ", а зажим "+" к гнезду x_9 .
- 3. Для измерения временных параметров колебаний мультивибратора вход осциллографа подключают к гнезду 3, а вывод « \perp » к гнезду x_8 .

- 4. Для измерения постоянных составляющих напряжений в схеме используют ABM2 на пределах "10 В", "5 В", "1 В" и "0,5 В". Режим работы схемы любой согласно табл. 19.1.
- 5. Для наблюдения осциллограмм используют открытый вход осциллографа относительно линии нулевого потенциала.
- 6. Для синхронизации частоты мультивибратора используют ГПИ стенда. Синхронизацию мультивибратора наблюдают при сменных элементах $R_2 = R_3 = 51$ кОм; $C_2 = C_4 0.01$ мкФ. Частоту синхроимпульсов устанавливают равной 2 кГц. Для измерения частоты синхроимпульсов используют ЧМ стенда, для чего тумблер "ЧМ-ГНЧ" переключают в положение ГНЧ, переключатель ИВ в положение "ЧМ", переключатель ЧМ в положение "5 кГц". Переключатели ГНЧ и ГПИ "Диапазон" устанавливают в положение "10 кГц". Частоту синхроимпульсов устанавливают регулятором ГНЧ "Частота". Регуляторы ГПИ "Длительность" и "Амплитуда" поворачивают по часовой стрелке до упора, что соответствует максимальной длительности синхроимпульсов для этого диапазона и максимальной амплитуде. Зажим ГПИ подключают к гнезду 2, а зажим "1" к гнезду x_2 .
- 7. Для наблюдения эффективности синхронизации устанавливают резистор $R_2 = 100$ кОм (переменный). Сняв импульс синхронизации, получают, регулируя резистор R_2 , выходную импульсную последовательность со скважностью 2. Затем вводят синхроимпульс, добиваются синхронизации и убеждаются, что при небольшом повороте ручки резистора R_2 мультивибратор не выпадает из режима синхронизации. Уменьшая до нуля амплитуду синхроимпульсов, убеждаются, что без них временные параметры колебаний мультивибратора другие.
- 8. Для наблюдения режима деления частоты увеличивают частоту синхроимпульсов и сравнивают полученную осциллограмму с временной диаграммой, приведенной на рис. 19.4. Затем наблюдают деление частоты на 2, 3, 4 и т.д.

Контрольные вопросы

- 1. Каково происхождение термина "мультивибратор"?
- 2. Как выполняются условия баланса фаз и амплитуд в схеме мультивибратора.

- 3. От каких элементов схемы зависят временные параметры импульсов мультивибратора?
- 4. Как можно регулировать частоту и скважность импульсной последовательности на выходе мультивибратора?
- 5. Как можно уменьшить длительность фронта отрицательного перепада?
- 6. Каковы максимальные значения скважности импульсной последовательности в исследуемом мультивибраторе?
 - 7. Поясните процесс синхронизации мультивибратора.
- 8. Поясните процесс деления частоты с помощью мультивибратора.
- 9. Как влияет напряжение питания E_C на параметры колебательного процесса в мультивибраторе?

Вариант II. Описания лабораторных работ при оснащении лаборатории оборудованием «Электронная лаборатория ELVIS II»

Проектирование электронных схем и компонентов Multisim (Electronics Workbench)

Программное обеспечение (ПО) National Instruments Circuit Design Suite 10.1 позволяет проводить лабораторные занятия и работать с реальными сигналами.

Используя одновременно Multisim 10.1 и NI ELVIS II, студенты могут переключаться между режимами моделирования и реального эксперимента, сравнивать их результаты и проводить все этапы проектирования, моделирования и тестирования в рамках одной платформы. Такой подход формирует целостный взгляд и понимание всего процесса проектирования электрических схем.

Данный подход, в рамках единой платформы National Instruments, позволяет полностью замкнуть цикл разработки электронных устройств, включающий в себя моделирование электронной схемы, создание прототипа изделия и его тестирование с помощью реального контрольно-измерительного оборудования.

Воспользовавшись данной возможностью, студенты смогут самостоятельно пройти через все стадии разработки и создания реального электронного изделия — от разработки его принципиальной схемы до тестирования конечного продукта.

ПО Circuit Design Suite – объединяет программные среды:

• Multisim 10.1 — средство разработки и моделирования электронных схем. NI Multisim позволяет создать схему, используя общирную библиотеку компонентов, и эмулировать поведение интегральной схемы с помощью стандартного промышленного симулятора SPICE. Начиная с версии 10.1 в Multisim интегрирован МСИ Module, позволяющий добавить в SPICE-эмулированную интегральную схему микроконтроллер и программировать его на С или Ассемблере. Эту возможность оценят студенты, научившись работать с микроконтроллерами Intel/Atmel 8051/8052 и Microchip PIC16F84a.

Модуль позволяет эмулировать работу интегральной схемы с микроконтроллером и различными дополнительными устройствами: RAM, ROM, клавиатурой, разнообразными графическими и буквенно-цифровыми ж-к дисплеями.

- *UltiBoard* 10.1 простая в использовании и интуитивно понятная платформа разработки печатных плат. Этот модуль позволяет пройти все стадии разработки: от расположения элементов до соединения их проводниками с минимальными усилиями и временными затратами. Модуль содержит множество полезных функций, таких как автоматическая прокладка проводников по оптимальному маршруту.
- SignalExpress интерактивная среда для быстрого сбора, анализа и представления данных, поддерживающая сотни различных плат ввода/вывода и приборов сбора данных. при этом она не требует программирования. Включенная справочная система по множеству методов и приборов сбора данных позволяет легко автоматизировать задачу управления или измерения.

Программное обеспечение для 3D моделирования и визуализации интегрировано в LabVIEW 8.6.

ПО NI Sensor Мар обеспечивает революционный способ визуализации и анализа данных, передавая выходные данные на 3D геометрическую модель тестируемого объекта. Используя NI Sensor Мар, студенты могут импортировать чертежи испытуемых изделий из стандартных программ графического проектирования (САD или САЕ) и строить карту нагрузок, температурных полей и т.д., сравнивая с реальным тестированием, тем самым выявляя погрешность, возникающую при моделировании тестов. Кроме того, можно отображать на 3D модели результаты реальных тестов и динамически изменять входные параметры.

Измерения, обработка данных и управление экспериментом. Набор оборудования National Instruments представляет собой базовую систему для начала работы по автоматизации практикумов и учебных стендов.

В зависимости от задания и технических требований, можно комплектовать системы измерения, обработки данных и управления экспериментом из существующих библиотек.

Оборудование для лаборатории представляет собой набор измерительных модулей для различных типов датчиков со встроен-

ным согласованием сигналов на базе интерфейсов USB, Ethernet и Wi-Fi с комплектом датчиков, терминальными блоками для коммутации сигналов и курсом по основам измерений. Лаборатория подключается к уже существующей проводной или беспроводной сети либо комплектуется дополнительным оборудованием для её создания, а также ПК или ноутбуками (рис. II.1).



Рис. II.1

Оборудование С-серии позволяет реализовать основные практикумы и лабораторные работы по основам снятия измерений с датчиков, обработке и анализу сигналов на базе новейших измерительных технологий виртуальных приборов.

Модульные измерительные приборы на базе ПК. Основные измерительные приборы (осциллограф, мультиметр и генератор сигналов) используются для исследований во всех естественных науках. Используя технологии National Instruments можно программно настроить функции, параметры и интерфейс прибора, а при необходимости быстро изменить их.

Применение USB плат позволяет использовать персональный компьютер или ноутбук как измерительную станцию и существенно сократить объем приборов на рабочем столе.

Интеллектуальные системы сбора данных, обработки и управления на базе платформы CompactRIO (рис. II.2). ПО NI CompactRIO сочетает в себе контроллер реального времени, а также промышленные модули ввода/вывода со встроенным согласованием сигналов, возможностью прямого подключения датчиков и поддержкой горячего подключения. Рабочий температурный диапазон от –40 до +70 °C. Питание от 19 до 30 В.

Технология RIO предоставляет пользователям LabVIEW возможность графического конфигурирования ПЛИС и позволяет су-

щественно сократить время, затрачиваемое на обучение инженеров программированию ПЛИС.



Рис. II.2

LabVIEW версии 8.6 позволяет работать с системой CompactRIO в режиме Scan mode, позволяющем получать сигнал с датчиков без необходимости программирования.

Учебный стенд и практикумы по электронике

Платформа NI ELVIS II (Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite, учебная лабораторная станция виртуальных приборов) является базовым решением для разработки и создания лабораторных практикумов в колледже.

Платформа NI ELVIS II представляет собой настольную лабораторную станцию для подключения к ПК с графической средой программирования LabVIEW (рис. II.3). Объединение этих компонентов в рамках единой системы делает NI ELVIS II мощной и гибкой контрольно-измерительной платформой. Настольная рабочая станция NI ELVIS II осуществляет обмен данными с программным обеспечением, разработанным в LabVIEW для измерения и передачи сигналов.

Студенты могут проектировать аналоговые и цифровые схемы, моделировать прототипы систем и устройств в среде визуального моделирования электронных схем и компонентов MultiSim 10.1, Собирать прототип на реальной платформе и тестировать при помощи приборов, входящих в состав ELVIS II. Тем самым они получают уникальную возможность пройти весь цикл создания элек-

тронного макета на единой платформе – от моделирования до тестирования реального прототипа устройства.



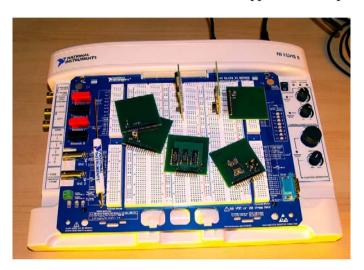
Рис. П.3

Оборудование платформы:

- 1. Макетная плата (2800 гнезд), служащая для самостоятельной разработки электрических цепей и устройств, монтажа датчиков и управляемых систем. Макетная плата позволяет подавать сигналы на созданные схемы.
- 2. Лабораторная станция NI ELVIS II с интерфейсом USB служит для сбора данных, генерации и согласования сигналов, которые подаются на схемы, на макетной плате:
 - 8/16 каналов аналогового ввода,16 разрядов, 1,25 МГц;
 - 2 канала аналогового вывода, 16 разрядов, 2,8 МГц;
 - 24 цифровых линий ввода/вывода, 10 МГц;
 - 2 счетчика/таймера;
- регулируемые источники постоянного напряжения в диапазоне $\pm 12B$;
- стабилизированные источники постоянного напряжения +5B, ± 15 ;
 - ВNС разъемы для мультиметра и осциллографа;
- схемы защиты от короткого замыкания и высокого напряжения.
 - 3. Программное обеспечение, реализующее функции:
 - цифрового мультиметра;
 - осциллографа;
 - функционального генератора;
 - генератора сигналов произвольной формы;
 - перенастраиваемого источника постоянного напряжения;

- анализатора АЧХ и ФЧХ цепей;
- анализатора спектра;
- BAX;
- устройства чтения и записи цифровых сигналов.
- 4. Набор драйверов и примеров для LabVIEW
- 5. Методическое описание 10 лабораторных работ

Учебный стенд – аналоговая и цифровая электроника



Описание стенда

Лабораторный практикум по электронике и микропроцессорной технике предназначен для студентов и учащихся образовательных учреждений среднего профессионального образования, изучающих курс «Электротехники и электроники».

Практикум построен с использованием технологии виртуальных приборов и включает комплексные работы по аналоговой и цифровой электронике, в которых исследуются характеристики различных полупроводниковых элементов, аналоговых микросхем, логических и цифровых элементов, а также устройств на их основе.

Обзор NI ELVIS II

NI ELVIS II использует приборы, разработанные в программной среде LabVIEW, специально спроектированную настольную рабочую станцию и макетную плату, которые обладают функциональностью комплекта наиболее распространенных лабораторных приборов.

Программное обеспечение NI ELVISmx служит для управления функционированием аппаратных средств NI ELVIS II с помощью спроектированных в LabVIEW лицевых панелей (Soft Front Panels – SFPs) следующих измерительных приборов:

- гнератора сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Generator ARB);
- аализатора амплитудно- и фазочастотных характеристик (Bode Analyzer);
 - устройства чтения цифровых данных (Digital Reader);
 - устройства записи цифровых данных (Digital Writer);
 - цифрового мультиметра (Digital Multimeter DMM);
 - анализатора спектра (Dynamic Signal Analyzer DSA);
- функционального генератора сигналов (Function Generator FGEN);
 - анализатора импеданса (Impedance Analyzer);
 - ссциллографа (Oscilloscope Scope);
- анализатора вольт-амперной характеристики двухполюсников (Two-Wire Current Voltage Analyzer);
- анализатора вольт-амперной характеристики четырехполюсников (Three-Wire Current Voltage Analyzer);
- регулируемых источников питания (Variable Power Supplies).

Кроме того, в комплект включены экспресс-функции (Express VIs) LabVIEW и наборы функций (Steps) SignalExpress для программирования NI ELVIS II в этих средах, а также приборы NI ELVIS, интегрированные в NI Multisim.

NI ELVIS эффективен для организации занятий по основам электроники. Комплект NI ELVIS II предоставляет широкие возможности для измерений и испытаний, необходимых в ходе этих занятий, обеспечивает сохранение получаемых данных. Студенты

могут монтировать схемы на съемной макетной плате серии NI ELVIS II дома, чтобы более эффективно использовать время в лаборатории.

Виртуальные приборы NI ELVIS II, такие, например, как AЧХ/ФЧХ анализатор и анализатор спектра, дают преподавателям возможность проводить занятия по углубленному изучению предметов, используя обработку и анализ сигналов. Например, студенты могут создавать цифровые фильтры в LabVIEW с помощью программ или реализовывать фильтры аппаратно на макетной плате, а затем сравнивать их характеристики.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА И ФОРМЫ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Цель работы: определение параметров напряжения на выходе регулируемого источника питания.

Порядок проведения работы

- 1. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 2. Выбрать иконку с надписью **DMM**. На экране появится лицевая панель ВП **NI ELVISmx Digital Multimeter**. Для измерения постоянной составляющей напряжения необходимо перевести виртуальный прибор в соответствующий режим, нажав на кнопку **V**=
- 3. Соединить контактный разъём SUPPLY + с разъемом « $V\Omega$ » на боковой панели NI ELVIS II, а разъём GROUND с «COM» на боковой панели NI ELVIS II.
- 4. Запустить **NI ELVISmx Instrument Launcher** и с помощью кнопки **VPS** запустите прибор управления источниками питания. Установить уровень выходного напряжения питания положительной полярности, например, +3 В. Наблюдать за результатами измерения постоянной составляющей напряжения с помощью мультиметра (рис. 20.1).
- 5. Перевести ВП **NI ELVISmx Digital Multimeter** в режим непрерывного измерения переменного напряжения, нажав на кнопку.





Рис. 20.1

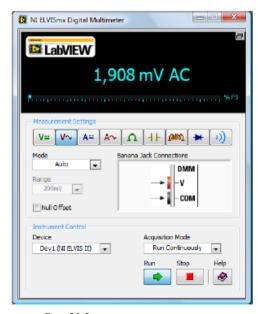


Рис. 20.2 дать ссылку в тексте

- 6. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 7. Нажать на кнопку с надписью Scope. На экране появится лицевая панель виртуального прибора NI ELVISmx Oscilloscope. На лицевой панели ВП NI ELVISmx Oscilloscope установить в качестве источника сигнала по первому каналу Channel 0 SCOPE CH 0, а второй канал Channel 1 сделать неактивным (в поле Channel 1 Settings убрать выставленную галочку напротив надписи Enable). ВNC разъём SCOPE CH 0, располагающийся на боковой панели NI ELVIS II, необходимо соединить BNC кабелем со входом BNC 1. Например, соединть контактный разъём SUPPLY + с контактным разъёмом BNC 1+, BNC 1 с GROUND. Тип триггеринга установить Immediate. В поле Coupling должен быть выбран режим измерения напряжения без фильтрации постоянной компоненты DC (Direct Current).
 - 8. Запустит. **NI ELVISmx Instrument Launcher**.
- 9. Запустит. виртуальный прибор с надписью **VPS**. На экране появится лицевая панель регулируемого источника питания ВП **NI ELVISmx Variable Power Supplies** (рис. 20.3). Установитьуровень выходного напряжения питания положительной полярности величиной 3 В. Наблюдать за результатами измерения.

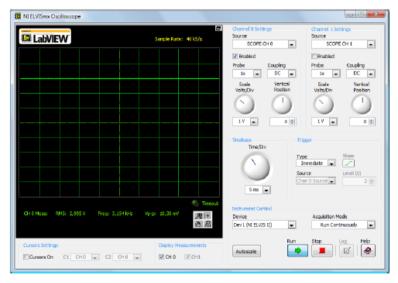


Рис. 20.3

Обратить внимание на значение RMS на дисплее $B\Pi$ NI ELVISmx Oscilloscope.

10. В поле **Coupling** выбрать режим фильтрации постоянной составляющей напряжения **AC** (**Alternating Current**).

Контрольные вопросы

1. Какие выводы можно сделать из полученных результатов?

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХПОЛЮСНИКА

Цель работы: определение параметров напряжения и силы тока двухполюсника.

Задание

Определить параметры напряжения и силы тока, используя в качестве двухполюсника красный светодиод.

Порядок проведения работы

- 1. Запустить **NI ELVISmx Instrument Launcher** и загрузите цифровой мультиметр (**DMM**).
- 2. Перевести мультиметр в режим измерения постоянного тока, нажав на кнопку ...
- 3. Воспользоваться контактными клеммами, одну из которых подсоедините на боковой панели **NI ELVIS II** к «**COM**» (земля), а другую к «**A**».
- 4. Найти на макетной плате **NI ELVIS II** контактные выходы, отвечающие за регулируемый источник питания (**Variable Power Supplies**). Для измерения тока через светодиод соединить контактный разъём **SUPPLY** + с контактной клеммой «**COM**», а катод светодиода с контактной клеммой «**A**». Контактный разъём **GROUND** соединить с анодом светодиода.
- 5. Запустить лицевую панель регулируемого источника питания (NI ELVISmx Instrument Launcher -> VPS).
- 6. Настроить автоматическое изменение напряжения питания со временем, для этого в поле **Sweep Settings** устанавить следующие параметры:

Supply Source

Supply+

Start Voltage 0,00 B
Stop Voltage 2 B
Step 0,05 B
Step Interval 5000 мс

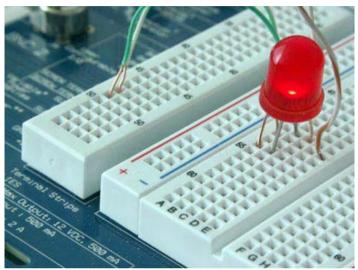


Рис. 21.1

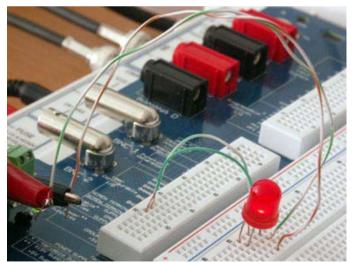


Рис. 21.2 Дать ссылки на эти рис. в тексте!

Максимально возможный ток для большинства светодиодов составляет 50-100 мА. Поэтому особое внимание необходимо уделять расчёту максимального напряжения питания — **Stop Voltage**, в противном случае это приведёт к выходу светодиода из строя.

Запустить источник питания (нажатием кнопки **Sweep**) и последовательно записать для каждого значения напряжения значение силы тока, измеряемого цифровым мультиметром.

АНАЛИЗ СИГНАЛА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА И СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА

Цель работы: проанализировать сигнал произвольной формы с помощью осциллографа и спектроанализатора.

Порядок проведения работы

- 1. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 2. Загрузить генератор сигнала произвольной формы (ARB). На экране появится лицевая панель виртуального прибора NI ELVISmx Arbitrary Waveform Generator.
- 3. Для создания сигнала необходимой формы надо воспользоваться редактором шаблона сигнала Waveform Editor. Для этогонажать на кнопку Waveform Editor , чтобы загрузить приложение для создания шаблонов сигнала. В качестве шаблона сигнала создать обычный синусоидальный сигнал. Для этого в первый сегмент (а он будет всего один) на временном отрезке (0, 10 мс) добавить компонент из библиотеки примитивов Function Library -> Sine. Для этого нажать на кнопку New Component. На лицевой панели Waveform Editor ввести следующие параметры:

Sample Rate Amplitude $\mathbf{2} \ \mathbf{B}$ Freq $\mathbf{1} \ \kappa \Gamma \mathbf{\mu}$ Phase $\mathbf{0}$

- 4. Сохранить созданный шаблон сигнала в формате .wdt (File Menu»Save As), используемом в генераторе ВП ELVISmx Arbitrary Waveform Generator.
- 5. Нажать на кнопку **Next** в правом нижнем углу диалогового окна. Следующее диалоговое окно всплывет для изменения частоты дискретизации (**Sample Rate**) и количества точек (**Number of Samples**). В следующем окне можно выбрать имя файла, в который будет сохранен созданный шаблон сигнала, пусть файл будет называться **2Vsine1000.wdt**. После чего закрыть **Waveform Editor**.

6. Возвратитесь к лицевой панели генератора ВП ELVISmx Arbitrary Waveform Generator. В поле Waveform Settings активизировать аналоговую линию AO 0 для передачи по ней аналогового сигнала, созданного в редакторе Waveform Editor. В поле настроек временных параметров и синхронизации Timing and Triggering Settings выставить следующие значения Update Rate — 100 kS/s и Trigger Source — Immediate (без синхронизации). Нажать на кнопку Run для начала генерации сигнала по аналоговой линии AO 0 через контакты на макетной плате NI ELVIS II.

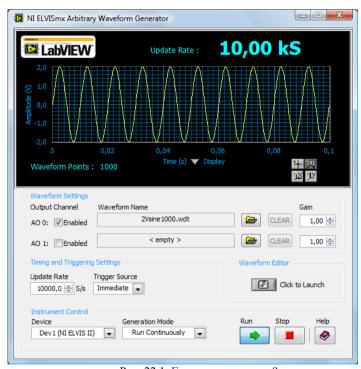


Рис. 22.1 Где ссылка в тексте?

7. Для анализа сигнала, генерируемого по аналоговой линии **AO 0**, использовать осциллограф ВП **ELVISmx Oscilloscope**. На лицевой панели осциллографа (**Oscilloscope**) установить в качестве источника сигнала по первому каналу **Channel 0 SCOPE CH 0**, а второй канал **Channel 1** сделать неактивным (в поле **Channel 1 Settings** убрать выставленную галочку напротив надписи **Enable**).

BNC разъём SCOPE CH 0, располагающийся на боковой панели NI ELVIS II, соединить BNC кабелем с входом BNC 1. Соединить контактный разъём AO 0 (Analog Outputs) с контактным разъёмом BNC 1+, BNC 1- с GROUND. В результате на макетной плате NI ELVIS II должно получиться так, как показано на рис. 22.2.

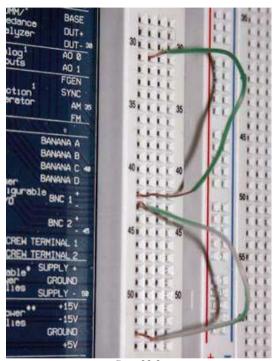


Рис. 22.2

8. Выбрать в качестве источника синхронизации канал Edge - Chan 0 Source. Такая настройка типа синхронизации берёт сигнал, приходящий на первый канал Channel 0 ВП NI ELVISmx Oscilloscope, устанавливает тип аналоговой синхронизации по фронту (Edge) и позволяет пользователю установить уровень синхронизации Level и указать параметр синхронизации по спадающему или по нарастающему фронту сигнала (Slope).

Установить уровень синхронизации на 0 В. Если всё сделано правильно, на экране осциллографа ВП NI ELVISmx Oscilloscope

должен отображаться сигнал с первого канала **Channel 0**. Обратите внимание на положение ручки временной развёртки **Time/Div**.

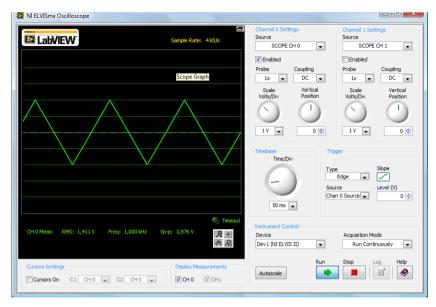


Рис. 22.3 Ссылка?

9. Сделать так, чтобы на осциллограмме был синусоидальный сигнал.

На лицевой панели генератора ВП ELVISmx Arbitrary Waveform Generator изменим скорость обновления (Update Rate) напряжения на канале вывода аналогового сигнала. Изначально её значение равнялось 100 000 точек/секунду, посмотреть, что произойдёт, если уменьшить значение до 10 000 точек/секунду.

10. Сравнить значения частоты (Freq) на экране осциллографа ВП NI ELVISmx Oscilloscope:

Update Rate = $100\ 000\$ точек/секунду Freq = $1\$ к Γ ц Update Rate = $10\ 000\$ точек/секунду Freq= $100\$ Гц

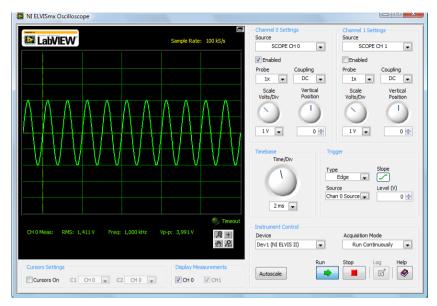


Рис. 22.4 Ссылка?

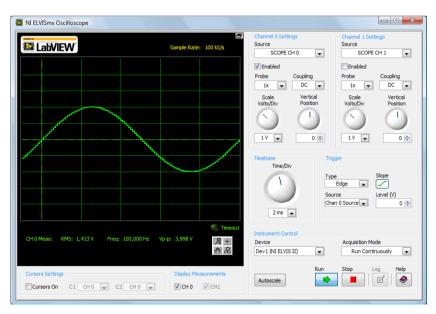


Рис. 22.5 Ссылка?

Так происходит, так как шаблоне генерируемого сигнала было фиксированное количество точек. **Update Rate** представляет собой частоту обновления состояния канала **AO 0** вывода аналогового сигнала. Фактически в соответствии с механизмом прямого цифрового синтеза изменение скорости вывода точек (**Update rate**) изменяется частота тактовых импульсов. Таким образом, единственным способом сохранить число отсчётов и при этом уменьшить частоту обновления канала аналогового вывода является уменьшение частоты генерируемого аналогового сигнала.

- 11. Для анализа искажений аналогового сигнала надо воспользоваться анализатором спектра NI ELVISmx Dynamic Signal Analyzer. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher, загрузить анализатор спектра (DSA). На экране появится лицевая панель виртуального прибора NI ELVISmx Dynamic Signal Analyzer. В качестве источника входных сигналов выбрать BNC выход SCOPE CH0 на боковой панели NI ELVIS II. Значение максимальной частоты (Frequency Span) установить на 50000 Гц. Значение разрешения (Resolution) пусть будет равно 400. В поле настроек синхронизации (Trigger Settings) установить в качестве типа синхронизации аналоговую синхронизацию по уровню (Edge) напряжения по каналу SCOPE CH 0, т.е. в поле Source выбрать Source Channel, а уровень (Level) установить равным 0 В.
- 12. Нажимать на кнопку **Run** и наблюдать за временным и спектральным представлением сигнала на дисплее анализатора спектра **NI ELVISmx Dynamic Signal Analyzer**.

Во время выполнения лабораторной работы необходимо обратить внимание на:

- 1) установку максимальной частоты исследуемого спектрального диапазона (Frequency Span), этот элемент управления, фактически определяет значение частоты дискретизации (Sample Rate), которая автоматически равна удвоенному значению максимальной частоты. При уменьшении максимальной частоты спектра (Frequency Span) автоматически уменьшается частота дискретизации, но при этом отношение между ними всегда остаётся равным двойке.
- 2) то, что автоматически регистрируемая основная частота сигнала (**Detected Fundamental Frequency**) равна **1** кГц, что соответствует созданному нами шаблону сигнала с помощью редактора **Waveform Editor**.

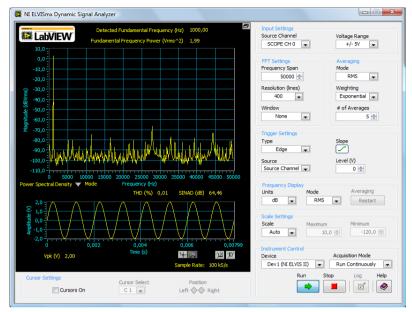


Рис. 22.6 ссылка?

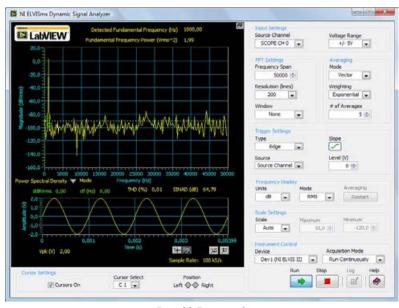


Рис. 22.7 ссылка?

Параметр **Resolution (lines)** определяет количество оцифрованных точек в выборке аналогового сигнала, получаемого по каналу **SCOPE CH 0**, при фиксированной частоте дискретизации. Таким образом, увеличение разрешения (**Resolution**) приводит к увеличению длины выборки сигнала во времени.

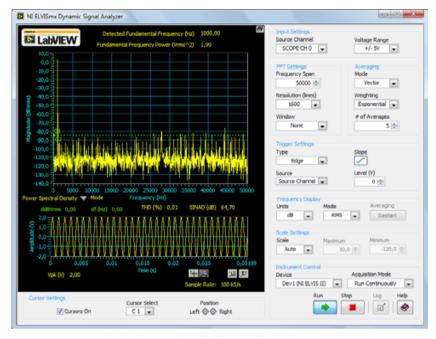


Рис. 22.8 ссылка?

- 13. Установить максимальное значение частотного интервала (Frequency Span) равным 2000 Гц, а разрешение (Resolution) равным 200. Увеличить спектральную область анализируемого сигнала вблизи пика основной частоты с помощью лупы из палитры инструментов, проверьте на соответствие со следующим изображением (рис.).
- 14. Изменить шаблон сигнала, генерируемого по каналу **AO 0**. Пусть теперь это будет прямоугольный сигнал с частотой **1** $\kappa \Gamma u$. На правой картинке представлен спектр прямоугольного сигнала. Максимальная частота в спектре сигнала составляет **50** $\kappa \Gamma u$.

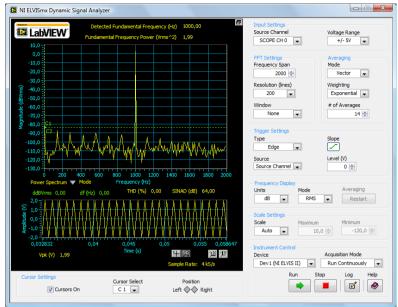


Рис. 22.9 ссылка?

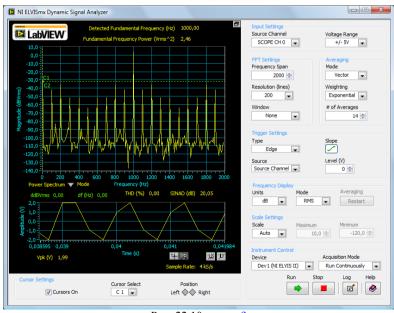


Рис. 22.10 ссылка?

15. Запустить **NI ELVISmx Instrument Launcher** и загрузите анализатор спектра **(DSA)**. На лицевой панели анализатора спектра **Dynamic Signal Analyzer** в качестве максимальной частоты в спектре анализируемого сигнала (**Frequency Span**) установить значение **2000** Гп, а разрешение (**Resolution**) сделать равным **200**.

TAXOMETP

Цель работы: изучение тахометра.

Залание

Построить простой датчик движения, используя ИК светодиод (IR LED) и фототранзистор или оптопарный модуль с щелью.

Порядок проведения работы

1. На макетную плату **NI ELVIS II** поместить компоненты составляющие, представленные на диаграмме (рис. 23.1). В случае оптопарного модуля внутренний светодиод используется в качестве оптического источника и питается от напряжения +5 В.

Резистор сопротивлением 1 кОм подключается последовательно со светодиодом для ограничения силы тока.

Резистор сопротивлением 10 кОм связывает фототранзисторный эмиттер и «землю», и точно такое же напряжение прикладывается к коллектору фототранзистора. Напряжение, снимаемое с нагрузки 10 кОм, и есть сигнал фототранзистора или тахометра.

2. Присоединить контакты 10 кОм резистора к контактным разъёмам AI4+, AI4-.



Рис. 23.1

- 3. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 4. Загрузить осциллограф (**Scope**). На экране появится лицевая панель виртуального прибора **NI ELVISmx Oscilloscope**.
- 5. Пронести листок бумаги между излучателем и приемником датчика движения, наблюдать за изменением осциллограммы (HI-LO-HI). Использовать колесико с гребёнкой, имеющей большое количество зубов. Покрутить колесико между датчиками для получения цуга импульсов. Можно также вносить и убирать листок бумаги как пилу для генерации постоянного потока импульсов (рис.23.2).

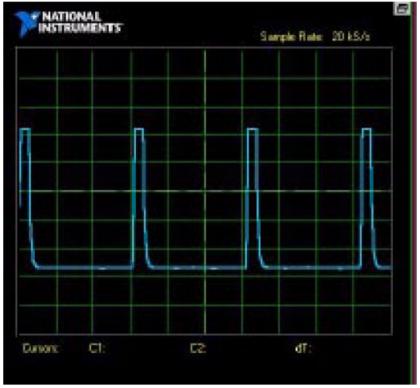


Рис. 23.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ВРЕМЕНИ

Цель работы: изучение цифрового датчика времени.

Задание

Определить колебательные характеристики цифрового датчика времени.

Приборы и установки

Цифровой датчик времени (рис. 24.1) представляет собой микросхему, включающую таймер, два резистора R_A = 10 кОм, R_B = 100 кОм и конденсатор C = 1 мкФ

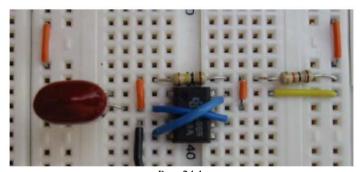


Рис. 24.1

Порядок проведения работы

1. Создайть электрическую схему цифрового датчика времени на макетной плате **NI ELVIS II**, руководствуясь рис. 24.2.

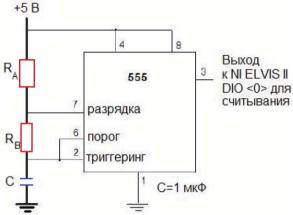
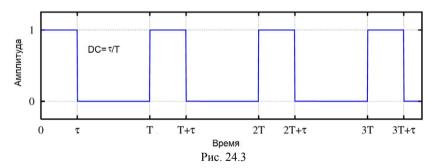


Рис. 24.2

Питание +5 В подается на 4 и 8 контакты микросхемы и через сопротивления R_A , R_B на контакты 7, 6 и 2 соответственно. Последние два контакта через конденсатор C подключаются к «земле». Заземление подключается к контакту.

2. Соединить выходной контакт 3 микросхемы с цифровой линией **DIO <0>** для считывания данных.



Период колебательного контура таймера выражается формулой: $T = 0.695 \cdot (R_A + 2R_B) \cdot C$ (c).

Частота колебательного контура таймера связана с периодом соотношением F = 1/T (Γ ц).

Колебательный контур таймера имеет коэффициент заполнения (это часть времени, в течение которой колебательная система находится в активном состоянии – длительность импульса/период):

$$DC = (R_A + R_B)/(R_A + 2R_B).$$

- 3. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 4. Загрузить осциллограф (Scope). На экране появится лицевая панель ВП NI ELVISmx Oscilloscope. На лицевой панели ВП NI ELVISmx Oscilloscope установить в качестве источника сигнала по первому каналу Channel 0 SCOPE CH 0, а второй канал Channel 1 сделать неактивным (в поле Channel 1 Settings уберать выставленную галочку напротив надписи Enable). ВNС разъём SCOPE CH 0, располагающийся на боковой панели NI ELVIS II, соединить ВNС кабелем с входом BNC 1. Соединить контакт 3 чипа микросхемы таймера с контактным разъёмом BNC 1+, BNC 1- с GROUND. После этого на дисплее ВП NI ELVISmx Oscilloscope будет отображаться цифровой сигнал по первому каналу Channel 0.
- 5. Выбрать в качестве источника синхронизации **Edge -> Chan 0 Source**. (Напомним ещё раз, что подобная настройка типа синхронизации берёт сигнал, приходящий на первый канал **Channel 0** ВП **NI ELVISmx Oscilloscope**, устанавливает тип аналоговой синхронизации (**Edge**) и позволяет пользователю установить уровень синхронизации **Level** и тип аналоговой синхронизации **Slope** (по спадающему или по нарастающему фронту сигнала).) Установить уровень синхронизации +1 В.
- 6. На экране ВП **NI ELVISmx Oscilloscope** в нижней его части наблюдать значение основной частоты (**Freq**). Включить курсоры, нажав на пустой квадратик рядом с надписью **Cursors On**, а потом **CH 0**. Используя курсоры, измерить период и коэффициент заполнения.

Записать::	
$T = \underline{\hspace{1cm}}$	(секунды)
au =	(секунды)
DC =	
F =	(Гц)

- 8. Завершит. работу ВП **NI ELVISmx Oscilloscope**.
- 9. Занести данные о проделанной работе в отчет.

ЧАСТОТНЫЙ ОТКЛИК БАЗОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучить частотный отклик базовой электрической схемы операционного усилителя.

Задание

Собрать электрическую схему операционного усилителя и изучить ее частотный отклик.

Приборы и установки

Макетная плата **NI ELVIS II** базовой схемы операционного усилителя (рис. 25.1).

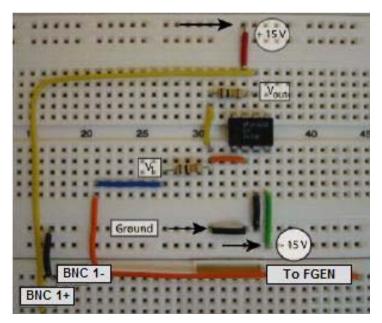
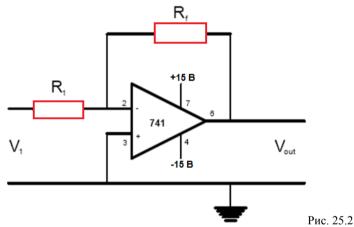


Рис. 25.1

Операционный усилитель использует питание +15~B~u-15~B по постоянному току. Контактные полосы +15~V, -15~V, Ground располагаются на макетной плате NI ELVIS II слева внизу в поле DC Power Supplies.

Порядок проведения работы

1. На макетной плате **NI ELVIS II** создайть простую схему усилителя на базе операционного усилителя КР140УД708 (импортный аналог LM741) с коэффициентом усиления 10, как показано на рис. 25.2.



- 2. Соединить вход операционного усилителя V1 с контактными разъёмами **FGEN** и **Ground**. Подсоединить выход операционного усилителя Vout к контактным разъёмам **BNC** 1+ и **BNC** 1-.
 - 3. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 4. Загрузить генератор стандартных функций (FGEN) и осциллограф (Scope). На экране появится лицевая панель ВП NI ELVISmx Function Generator и ВП NI ELVISmx Oscilloscope. На лицевой панели осциллографа ВП NI ELVISmx Oscilloscope установить в качестве источника сигнала по первому каналу Channel 0 SCOPE CH 0, а в качестве источника по второму каналу Channel 1 аналоговую линию AI0. ВNС разъём SCOPE CH 0, располагающийся на боковой панели NI ELVIS II, соединить ВNС кабелем с входом BNC 1.

- 5. На аналоговую линию **AI0+** подать сигнал с генератора **FGEN.** Заземление аналоговой линии **AI0** проводится с помощью соединения **AI0-** и **GROUND**.
- 6. На лицевой панели ВП **NI ELVISmx Function Generator**, установить следующие параметры:

Waveform Sine wave Peak Amplitude 1 B Frequency 1 $\kappa\Gamma$ U DC Offset 0 B

- 7. Проверить электрический контур, затем включить питание макетной платы **NI ELVIS II**.
- 8. Запустить осциллограф ВП NI ELVISmx Oscilloscope в режиме непрерывного сбора данных (Acquisition Mode >Run Continuously).
- 9. Наблюдать тестовый сигнал V1 на втором канале **Channel 1** и сигнал, прошедший через операционный усилитель, Vout на первом канале **Channel 0**.

Так как тестовый сигнал приходит от генератора **FGEN**, то на лицевой панели ВП **NI ELVISmx Oscilloscope** в поле **Trigger** нужно выбрать аналоговую линию синхронизации **EDGE**.

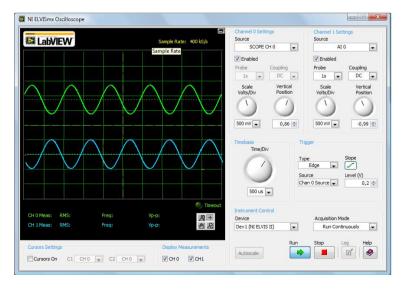


Рис. 25.3 ссылка?

- 10. Определить амплитуду сигнала на входе операционного усилителя (Channel 1) и на выходе (Channel 0), используя курсоры на лицевой панели ВП NI ELVISmx Oscilloscope. (Заметим, что выходной сигнал инвертирован относительно входного по причине инвертированной схемы операционного усилителя.)
- 11. Вычислить коэффициент усиления по напряжению (отношение амплитуды сигнала по первому каналу к амплитуде сигнала по второму каналу). Изменяя частоту генерируемого сигнала от **FGEN**, проследить за тем, как меняется ситуация на осциллограмме ВП **NI ELVISmx Oscilloscope**.
- 12. Завершить работу ВП NI ELVISmx Oscilloscope и NI ELVISmx Function Generator.
 - 13. Занесите данные о проделанной работе в отчет.

Лабораторная работа 26

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАССИВНОГО RC-КОНТУРА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: изучение электрического пассивного RC-контура.

Задание

Протестировать электрический пассивный RC-контура с помощью осциллографа.

Порядок проведения работы

- 1. Рассмотреть RC-цепочку, состоящую из резистора сопротивлением 10 кОм и конденсатора ёмкостью 10 нФ. Проанализировать частотные характеристики этого RC-контура с помощью осциллографа ВП **NI ELVISmx Oscilloscope.**
 - 2. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 3. Загрузить осциллограф (Scope). На экране появится лицевая панель виртуального прибора NI ELVISmx Oscilloscope. Использовать осциллограф ВП NI ELVISmx Oscilloscope в режиме, когда в качестве источника сигналов по каналам Channel 0 и Channel 1 используются ВNC разъёмы, расположенные на боковой панели NI ELVIS II. Более подробную информацию о том, как работать с осциллографом NI ELVISmx Oscilloscope в подобном режиме смотрите раздел «Использование Scope CH 0 и Scope CH 0» в этой главе.
- 4. Установить следующие параметры на лицевой панели NI ELVISmx Oscilloscope:

Channel 0 Settings: Source – SCOPE CH 0 Probe – 1x Channel 1 Settings: Source – SCOPE CH 1

Probe -1x

Coupling – DC Scale Volts/Div – 1 B Timebase :

Time/Div – 5 мс

Coupling – DC Scale Volts/Div – 200 MB Trigger: Type – Edge

Идея эксперимента заключается в следующем: сигнал, полученный с помощью встроенного в **NI ELVIS II** генератора, подаётся на вход RC-контура и с помощью осциллографа изучается видоизменённый сигнал, прошедший через RC-цепочку. Таким образом, с помощью ВП **NI ELVISmx Oscilloscope** будет исследоваться зависимость сигнала на выходе от сигнала на входе RC-контура, что позволит сделать вывод о частотных характеристиках используемого RC-контура.

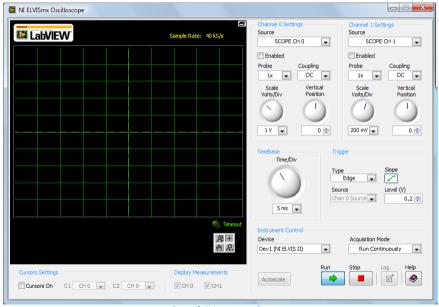


Рис. 26.1 ссылка?

5. Создать RC-контур на макетной плате **NI ELVIS II** в соответствии с платой (рис. 26.2) или схемой (рис 26.3).

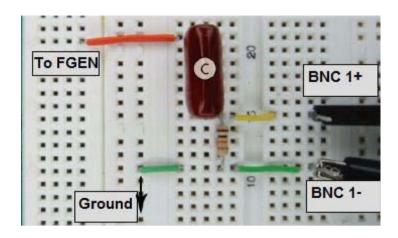


Рис. 26.2

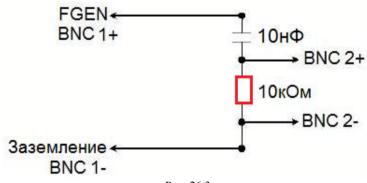


Рис. 26.3

- 6. Запустить NI ELVISmx Instrument Launcher.
- 7. Загрузить генератор стандартных сигналов (FGEN). На экране появится лицевая панель виртуального прибора NI ELVISmx Function Generator. Установить указанные на рис. 26.4 параметры на лицевой панели ВП NI ELVISmx Function Generator.

Сигнал с генератора поступает на контактный разъём осциллографа BNC 1+ и отображается на канале 0 (SCOPE CH 0), а с другой стороны этот же сигнал поступает на вход RC-цепочки. Внутри RC-контура он видоизменяется, и прошедший сигнал поступает на разъем осциллографа BNC 2+ и анализируется по второму каналу осциллографа NI ELVISmx Oscilloscope SCOPE CH 1.

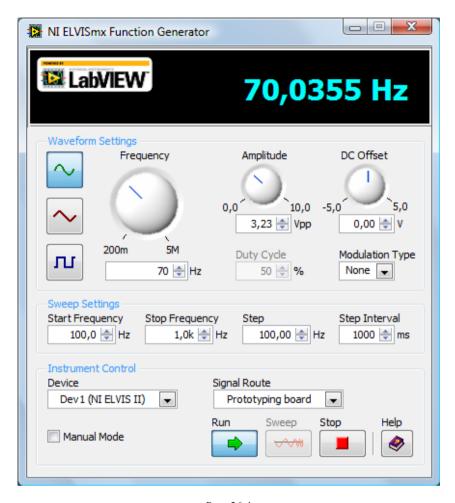


Рис. 26.4

Результат действий показан на рис. 26.5.

8. Отобразить отношение амплитуд сигналов по первому и второму каналам SCOPE CH 1 и SCOPE CH 0, варьируя частоту гармонического сигнала на лицевой панели генератора NI ELVISmx Function Generator в отчете.

Отношение амплитуды сигнала по второму каналу **SCOPE CH** 1 к амплитуде сигнала по первому каналу **SCOPE CH** 0 определяет коэффициент усиления RC-контура на соответствующей частоте

(частотная характеристика пассивного электрического RC-контура). Так как в электрическом контуре нет усиления, то коэффициент усиления должен быть меньше единицы.

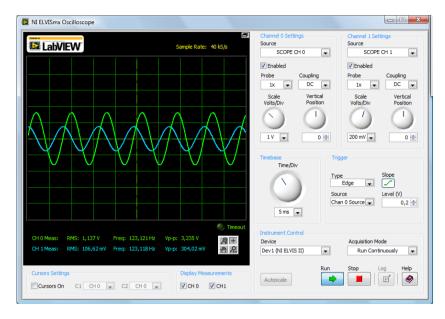


Рис 26.5

- 9. Определите частоту, при которой коэффициент усиления равен $1/\sqrt{2}$. С помощью курсоров на лицевой панели ВП **NI ELVISmx Oscilloscope** определите разность фаз между сигналом с первого и второго каналов **SCOPE CH 1** и **SCOPE CH 0** на соответствующей частоте.
- 10. Завершите работу ВП NI ELVISmx Oscilloscope и ВП NI ELVISmx Function Generator.
 - 11. Занесите данные о проделанной работе в отчет.

Лабораторная работа 27

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Залание

Сконфигурировать экспресс-ВП (Виртуальный прибор) осциллографа NI ELVISmx Oscilloscope и проанализировать сгенерированный им синусоидальный сигнал.

Порядок проведения работы

- 1. Запустить на компьютере LabVIEW.
- 2. Создайть новый проект **LabVIEW**. На блок-диаграмме выбрать из субпалитры функций **NI ELVISmx Express VI** экспресс-ВП генератора стандартных сигналов **NI ELVISmx Function Generator** и поместить его на любом пустом месте блок-диаграммы. Появится панель конфигурирования данного экспресс-ВП NI **ELVISmx** (рис. 27.1).
- 3. Выбрать в качестве типа генерируемого сигнала синусоидальный сигнал Sine с частотой Frequency(Hz), равной 100 Гц, и амплитудой Amplitude (Vpp), равной 1 В. Для завершения конфигурирования эксперсс-ВП нажать на кнопку ОК. После этого на блок-диаграмме появится виртуальный прибор (рис. 27.2) с входами для элементов управления параметрами, которые можно изменять на лету для данного экспресс-ВП. Для того чтобы увидеть название каждого отдельного элемента управления, надо потянуть за стрелочку на нижней границе прямоугольника экспресс-ВП.



Рис. 27.1

Для переконфигурирования экспресс-ВП необходимо либо нажать правой кнопкой мыши на самом экспресс-ВП и в выпадаю-

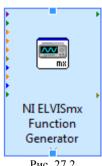


Рис. 27.2

щем меню выбрать Properties, либо дважды щелкнуть мышью по иконке экспресс-ВП. Это вернёт в окно конфигурирования экспресс-ВП. Или же Вы можете переконфигурировать экспресс-ВП используя параметры, которые доступны у этого эксперсс-ВП на блок-лиаграмме в виде поле ввода-вывода параметров.

Для анализа генерируемого синусоидального сигнала использовать экспресс-ВП осциллографа NI ELVISmx Oscilloscope. Выбрать его из субпалитры функций NI ELVISmx Express VI и

поместите на свободное место на блок-диаграмме. На экране поя-

вится окно конфигурирования экспресс-ВП **NI ELVISmx Oscilloscope** (рис. 27.3) По функциональности оно полностью повторяет функциональность ВП **NI ELVISmx Oscilloscope**.

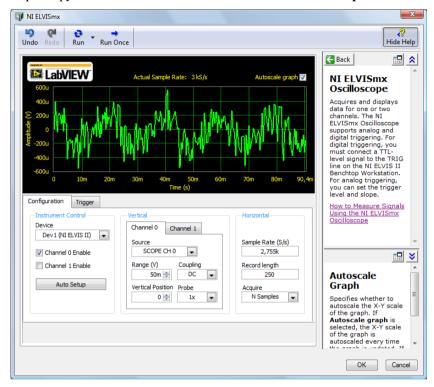


Рис. 27.3

- 5. В поле **Acquire** выбрать режим непрерывный работы **Continuously**.
- 6. При конфигурировании экспресс-ВП **NI ELVISmx Oscilloscope** на вкладке синхронизации **Trigger** установить в качестве типа синхронизации **Digital**, а в качестве источника внешних синхроимпульсов **TRIG**. Настроить так, чтобы синхронизация производилась по возрастающему фронту **Slope Positive**.
- 7. Для анализа сигнала, приходящего с генератора стандартных сигналов, использовать первый канал осциллографа **Channel 0 SCOPE CH 0.** BNC разъём **SCOPE CH 0**, располагающийся на бо-

ковой панели **NI ELVIS II**, соединить BNC кабелем с входом **BNC 1**. Контактный разъём генератора **FGEN** соедините с контактным разъёмом **BNC 1+**, **BNC 1-** с **GROUND**. В результате на макетной плате **NI ELVIS II** должно получиться так, как показано на рис. 27 4

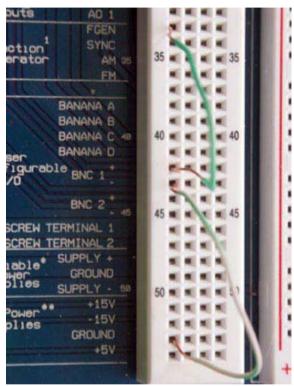


Рис. 27.4

8. Для внешней цифровой синхронизации соединить BNC вход **TRIG 5V TTL**, располагающийся на боковой панели **NI ELVIS II**, с внешним генератором импульсов. Учесть, что цифровой сигнал, подаваемый на вход **TRIG 5V TTL** с внешнего генератора должен соответствовать цифровому стандарту TTL ("0" – от 0 до 0,8 В; "1" – от 1,4 до 5 В).

BNC вход TRIG 5V TTL может использоваться как выход в случае, если у экспресс-ВП NI ELVISmx Function Generator в по-

ле **Signal Route** установлено **FGEN BNC**. Если в этом режиме работы экспресс-ВП **NI ELVISmx Function Generator** включить внешний генератор, то можно вывести из строя внутренний электрический контур.

9. После того, как конфигурирование обоих экспресс-ВП завершится, блок-диаграмма должна будет выглядеть так, как показано на рис. 27.5.

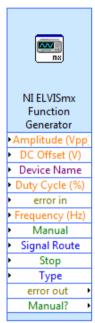




Рис. 27.5

10. Для вывода информации с осциллографа по первому каналу подвести указатель мыши к подю вывода данных ELVIS/Channel 0, нажать на него правой кнопкой мыши и выбрать в выпадающем меню пункт Create -> Graph Indicator.

Если выводить информацию с осциллографа непосредственно с блок-диаграммы, то необходимо подвести указатель мыши к полю параметра CH1 Enable, нажать правой кнопкой мыши на стрелочку и в выпадающем меню выбрать Create -> Constant, присвоив ей значение логической единицы (TRUE). Потом подвести указатель мыши к параметру ELVIS/Channel 1 и проделать все те же самые операции, что и для канала ELVIS/Channel 0.

Для одновременного вывода информации с обоих каналов на одинм график **Graph Indicator** протянуть провода от другого канала до пересечениия с проводком, соединяющим первый канал и **Graph Indicator**. Проконтролировать соответствие полученного изображения с рис. 27.6

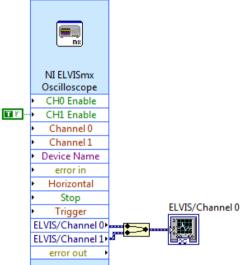


Рис. 27.6

В рамках решения данной задания надо использовать только первый канал ELVIS/Channel 0.

11. Для осуществления циклического сбора данных и анализа осциллограммы при изменении входных параметров генерируемого с помощью экспресс-ВП генератора NI ELVISmx Function Generator сигнала заключить оба экспресс-ВП в цикл While Loop, находящийся в палитре Programming -> Structures -> While Loop. Так как оба экспресс-ВП связаны друг с другом на аппаратном уровне через макетную плату NI ELVIS II и никак не связаны программно (через коннекторы в LabVIEW), то синхронизировать работу одного эксперсс-ВП относительно другого экспресс-ВП не представляет никакого смысла. Остановку программы необходимо осуществлять совместно с остановкой каждого отдельного экспресс-ВП через присутствующий у них бинарный параметр Stop. Так как данные экспресс-ВП работают независимо друг от друга,

то не имеет смысла следить за прекращением работы каждого отдельного экспресс-ВП в определённой последовательности. Таким образом, выходная блок-диаграмма должна иметь вид, показанный на рис. 27.7 или 27.8. Лицевая панель должна соответствовать рис. 27.9.

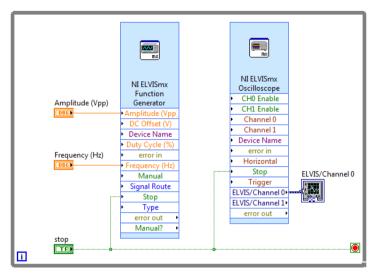


Рис. 27.7

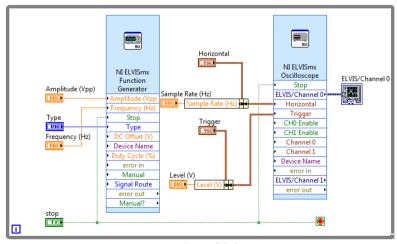


Рис. 27.8

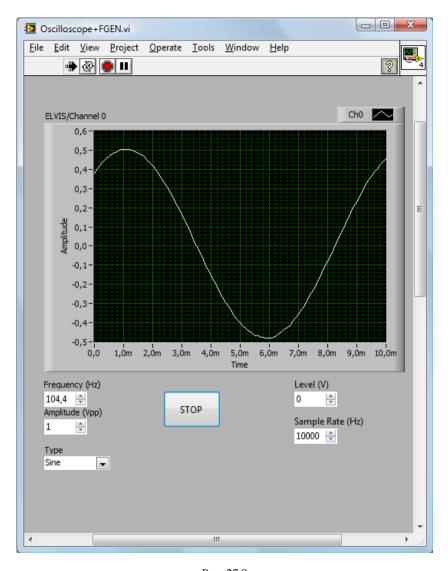


Рис. 27.9

12. Элементы управления Level (V) и Sample Rate (Hz) являются составляющими кластеров Trigger и Horizontal соответственно. Надо произвести следующие действия:

- подвести указатель мыши к параметрам **Trigger** или **Horizontal** экспресс-ВП **NI ELVISmx Oscilloscope**;
- нажать правой кнопкой мыши на стрелочку и в выпадающем меню выбрать пункт Create -> Constant. В этот момент создаётся шаблон кластера, используемого в качестве параметра Trigger или Horizontal экспресс-ВП NI ELVISmx Oscilloscope;
- удалитье проводник данных между созданной константой и самим экспресс-ВП;
- моединить проводником данных созданный кластер и вход input cluster функции Bundle By Name. В поле Bundle By Name появятся элементы управления различных типов, ранее объединённых внутри кластера;
- вывести значение необходимого элемента кластера для возможности изменения его значения с лицевой панели;
- соединить выход **output cluster** функции **Bundle By Name** с необходимым полем ввода экспресс-ВП **NI ELVISmx Oscilloscope**;
- создать элемент управления для параметра, выделенного из кластера для изменения его значения с лицевой панели.
- 13. Запустить созданный виртуальный прибор, нажав на его лицевой панели кнопку **Run**.
- 14. Изменяя частоту и амплитуду генерируемого сигнала, пронаблюдать за тем, как меняется форма графика на экране графического индикатора **ELVIS/Channel 1**.
- 15. Проделайте ту же самую работу, используя экспресс-ВП генератора сигнала произвольной формы NI ELVISmx Arbitrary Waveform Generator вместо экспресс-ВП генератора страндартных сигналов NI ELVISmx Function Generator.

В процессе работы программы изменение уровня синхронизации Level (V) и частоты дискретизации Sample Rate (Hz) невозможно. Для того чтобы измененные значения этих параметров вступили в силу необходимо перезапустить работу целого ВП.

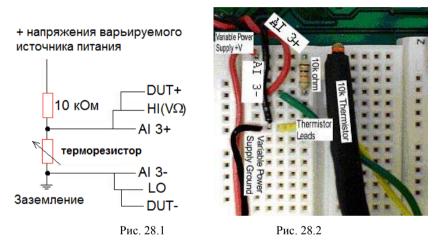
16. Написать отчет о проделанной работе.

Лабораторная работа 28

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Порядок проведения работы

1. На макетной плате **NI ELVIS II** соберите электрический контур по схеме (рис. 28.1).



На макетной плате электрическая схема терморезистора должна выглядеть так, как показано на рис. 28.2. На рисунке **Thermistor Leads** – это выходные контакты терморезистора.

- 2. Выбрать способ измерения напряжения на термисторе:
- а) измерять по аналоговой линии **AI 3** с помощью экспресс-ВП осциллографа **NI ELVISmx Oscilloscope** и регистрировать постоянную составляющую напряжения, потом её пересчитывать по соответствующим рекуррентным соотношениям в сопротивление, а потом уже в температуру;
- б) напрямую измерить сопротивление термистора в зависимости от приложенного напряжения от варьируемого источника питания с помощью контактных клемм, одна из которых соединяется с $\mathbf{HI}(\mathbf{V}\mathbf{\Omega})$, а другая с \mathbf{COM} на боковой панели \mathbf{NI} \mathbf{ELVIS} \mathbf{II} . Использовать при этом необходимо экспресс- $\mathbf{B\Pi}$ мультиметра \mathbf{NI}

ELVISmx Digital Multimeter, конфигурированный на измерение сопротивления. Потом это значение сопротивления пересчитывать уже в температуру;

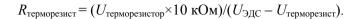
- в) измерять сопротивления терморезистора экспресс-ВП анализатора импеданса **NI ELVISmx Impedance Analyzer**. При этом необходимо измерять резистивную составляющую сопротивления, а потом это значение уже пересчитывать, используя рекуррентные соотношения, в температуру.
- 3. Измерить сопротивление терморезистора с использованием осциплографа.
- 3.1. Сконфигурировать экспресс-ВП программируемого блока питания NI ELVISmx Variable Power Supplies.
- 3.2. Подать на терморезистор напряжение положительной полярности. При использовании ручного режиме изменение напряжения положительной полярности выставить напротив **Manual** галочку в поле **Supply** + и нажать на кнопку **OK**.
- 3.3. На блок-диаграмме значение параметра Supply+ экспресс-ВП NI ELVISmx Variable Power Supplies надо сделать возможным для изменения с лицевой панели. Для этого подвести указатель мыши к параметру Supply+, нажать правой кнопкой мыши на стрелочку и в выпадающем меню выбрать Create -> Control.
- 3.4. Для измерения напряжения на терморезисторе следует использовать экспресс-ВП осциллографа NI ELVISmx Oscilloscope. Сконфигурировать его, установив в качестве источника сигнала по первому каналу осциллографа Channel 0 аналоговую линию AI 3. Во вкладке Trigger установить тип аналоговой синхронизации по уровню Edge, возрастающему фронту Positive Slope, по первому каналу Channel 0 Source. В поле Acquire установить режим непрерывного сбора данных Continuously и нажать на кнопку OK.

Полный ток в цепи одинаковый во всех узлах электрической цепи и равен по закону Ома $I_{\rm полн} = U$ эдс/ $R_{\rm сум}$.

В рассматриваемом случае $U_{\rm ЭДС}$ — это напряжение источника питания, а $R_{\rm сум}$ = 10 кОм + $R_{\rm терморезист}$.

Сопротивление терморезистора $R_{\text{терморезист}} = U_{\text{терморезист}}/I_{\text{полн}}$.

Используя выражение для полного тока и решая уравнение относительно $R_{\mbox{\scriptsize терморезист}},$ получаем:



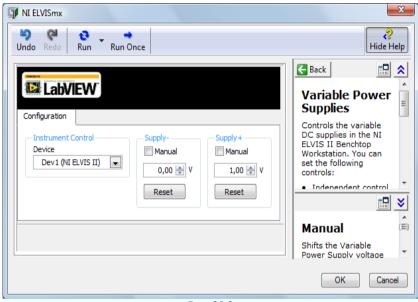


Рис. 28.3

3.5. Создать дополнительный ВП для вычисления сопротивления терморезистора. Он может выглядеть, например, как на рис. 28.4.

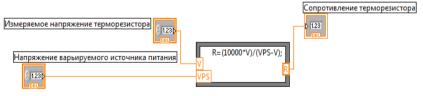


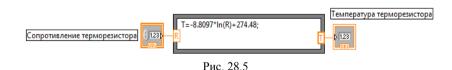
Рис. 28.4

3.6. У этого ВП назначить входными параметрами «Измеряемое напряжение на терморезисторе» и «Напряжение варьируемого источника питания», а выходным параметром — «Сопротивление терморезистора». Для назначения входных и выходных параметров ВП перейти на лицевую панель ВП и в правом верхнем углу окна нажать правой кнопкой мыши на иконку прибора. В выпадающем меню выбрать пункт **Show Connector**. Вместо иконки на экране

появится пустой прямоугольник с полями ввода/вывода. Нажать на него левой кнопкой мыши и в выпадающем меню выбрать пункт

Patterns -> Нажать левой кнопкой мыши на левый верхний квадратик и поставить ему в соответствие элемент управления «Измеряемое напряжения терморезистора», нажав на его элемент управления на лицевой панели; нажать левой кнопкой мыши на левый нижний квадратик и поставить ему в соответствие элемент управления «Напряжение варьируемого источника питания»; нажать левой кнопкой мыши на правый квадратик и поставить ему в соответствие индикатор «Сопротивление терморезистора». Сохранить ВП под именем Scaling.vi.

- 3.7. Для расчетов сопротивления терморезистора проще всего воспользоваться узлом формулы **Programming** -> **Structures** -> **Formula Node**. Для создания входных и выходных параметров **Formula Node**, навести указатель мыши на границу, нажать правую кнопку мыши и в выпадающем меню выбрать **Add Input** или **Add Output**. Элементы управления, ответственные за входные и выходные параметры ВП соединить проводниками данных с выходными и выходными параметрами **Formula Node**.
- 3.8. Создать дополнительный ВП для пересчёта сопротивления терморезистора (размерность ом) в температуру (размерность градус Цельсия), используя информацию о градуировочной кривой для данного терморезистора (рис. 28.5).



3.9. Сохранить этот ВП под именем **Convert R-T.vi**. Заключительная блок-диаграмма для измерения температуры терморезистора должна принять вид, показанный на рис. 28.6.

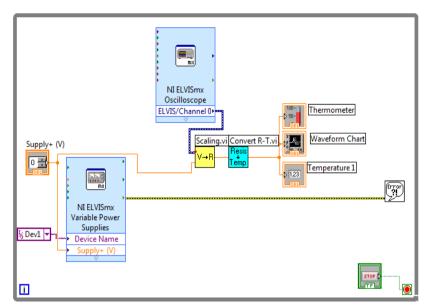


Рис. 28.6

- 3.10. Чтобы использовать созданные дополнительные ВП нажать правой кнопкой мыши на пустое место на блок-диаграмме, в выпадающем меню выбрать Select VI и открыть сохраненные ВП Convert R-T.vi и ВП Scaling.vi . Соединить входы и выходы экспресс-ВП и дополнительных ВП так, как показано на рис. 28.6. Для отображения изменяющегося значения температуры в зависимости от приложенного напряжения во времени используется Waveform палитре Controls выбрать Classic Graph» Waveform Chart). Для последующей идентификации возможных ошибок при компилировании ВП использовать Simple Error Handler.vi (в палитре Functions Programming -> Dialog & User Interface -> Simple Error Handler). Для этого соединить выходы экспресс-ВП (error out), соответствующие кластеру ошибок, с входом error in(no error) ВП Simple Error Handler.vi.
- 4. Измерение сопротивления терморезистора с использованием цифрового мультиметра.
- 4.1. Используя схему на рис. 28.1, соединить контактную клемму $\mathbf{HI}(\mathbf{V}\mathbf{\Omega})$ с контактным разъёмом макетной платы, располагаю-

щемся на месте средней точки терморезистора и 10 кОм сопротивления, а контактную клемму **СОМ** с общей «землёй».

4.2. Из субпалитры эксперсс-ВП **NI ELVISmx** выбрать экспресс-ВП **NI ELVISmx Digital Multimeter** и сконфигурировать его на измерение сопротивления. Для этого в окне конфигурации данного эксперсс-ВП в поле **Measurement Settings** выбрать значение **Measurement Function** -> **Resistance.** Элемент управления **Mode**, отвечающий за автоматическое определение диапазона измеряемых сопротивлений, должен иметь значение **Auto**. Для завершения конфигурирования нажать **OK**. Заключительная блок-диаграмма для измерения температуры терморезистора должна принять вид, показанный на рис. 28.7.

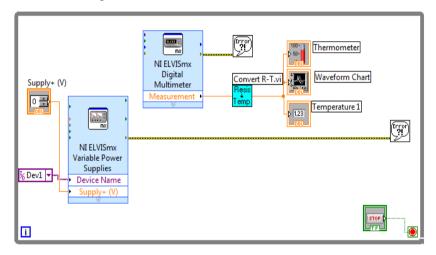


Рис 28.7

- 5. Измерение сопротивления терморезистора с использованием анализатора импеданса.
- 5.1. По схеме рис. 28.1 соединить контактный разъём **DUT**+ с контактным разъёмом макетной платы, располагающемся на месте средней точки терморезистора и 10 кОм сопротивления, а контактную клемму **DUT** – с общей «землёй».
- 5.2. Из субпалитры эксперсс-ВП **NI ELVISmx** выбрать экспресс-ВП анализатора импеданса **NI ELVISmx Impedance Analyzer** и сконфигурировать его на измерение резистивной со-

ставляющей сопротивления. Для этого в окне конфигурации данного эксперсс-ВП нажать не кнопку **OK**, оставив все параметры по умолчанию. На блок диаграмме растянуть терминал функции экспресс-ВП **NI ELVISmx Impedance Analyzer** вниз до появления первого параметра, нажать на активную область этого параметра левой кнопкой мыши и в выпадающем меню выбрать **Resistance(Ohms)** и соединить коннектором его с входом дополнительного ВП **Convert R-T**. Заключительная блок-диаграмма для измерения температуры терморезистора должна принять вид, показанный на рис. 28.8.

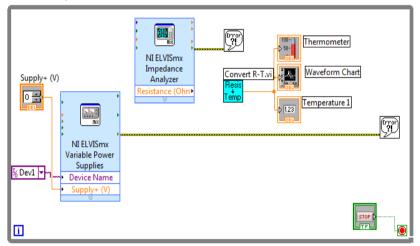


Рис. 28.8

6. Напишите отчет о проделанной работе.