

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Е.Ю. АБРАМОВ, Л.А. НЕЙМАН

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное-методическое пособие

НОВОСИБИРСК  
2017

УДК 621.316 (075.8)  
А 161

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *Е.А. Спиридонов*  
д-р техн. наук, профессор *Д.Л. Калужский*

Работа подготовлена на кафедре электротехнических комплексов  
и утверждена Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
III курса факультета мехатроники и автоматизации  
и заочного факультета (специальности 13.03.02 и 15.03.04)

**Абрамов Е.Ю.**

А 161 Электрические и электронные аппараты: учебно-методи-  
ческое пособие / Е.Ю. Абрамов, Л.А. Нейман. – Новосибирск:  
Изд-во НГТУ, 2017. – 48 с.

ISBN 978-5-7782-3211-2

Пособие содержит общие теоретические сведения и описание ла-  
бораторных работ по дисциплине «Электрические и электронные ап-  
параты» в части раздела «Электронные аппараты». Даны подробные  
указания по имитационному моделированию для исследования физи-  
ческих процессов в электронных аппаратах, приведены требования по  
технике безопасности, порядок выполнения лабораторных работ, тре-  
бования к оформлению отчетов и контролирующие материалы.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению  
«Электроэнергетика и электротехника» и «Автоматизация технологи-  
ческих процессов и производств».

УДК 621.316 (075.8)

ISBN 978-5-7782-3211-2

© Абрамов Е.Ю., Нейман Л.А., 2017  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2017

## **ВВЕДЕНИЕ**

Работы по курсу «Электрические и электронные аппараты» являются составной частью программы изучения дисциплины, предусмотренной дидактическими единицами ГОСа. Выполнение лабораторных работ обуславливает применение полученных теоретических знаний для решения конкретных практических задач, привитие навыков самостоятельного мышления, умелого использования программного пакета Micro-Cap в целях усвоения знаний по изучаемым разделам курса, развивает у студентов необходимые практические навыки, знакомит студентов с методами исследования физических процессов в электрических и электронных аппаратах.

Основное внимание при проведении лабораторных работ уделяется исследованию физических процессов, протекающих в аппаратах, снятию характеристик, освоению методов исследования влияния параметров коммутируемой цепи на физические процессы в электрических и электронных аппаратах.

Настоящее пособие составлено согласно учебной программе курса. Объем заданий рассчитан для выполнения каждой лабораторной работы в течение четырех часов.

Теоретические сведения являются ориентирующими, даны в минимальном объеме и предусматривают самостоятельную подготовку студентов по рекомендуемой литературе, приведенной в конце настоящей работы. Для контроля знаний предлагаются контрольные вопросы.

# **ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ**

## **1. Предварительная подготовка**

При подготовке к лабораторным работам необходимо изучить описание, приведенное в настоящем пособии, рекомендованную литературу, соответствующие разделы конспекта лекций, инструкцию по технике безопасности, уточнить объем задания, подготовить заготовку отчета (титульный лист, теоретические сведения, ответы на контрольные вопросы) и тетради для черновиков (задание, электрические схемы эксперимента, таблицы для записи результатов испытаний).

Группа студентов делится на подгруппы в составе одного-двух человек. Перед началом экспериментальной части работы каждый студент подгруппы должен предъявить руководителю занятий подготовленные материалы. Руководитель лабораторных занятий проверяет знания студентов по теме работы и их готовность к ее выполнению.

## **2. Допуск к работе**

Перед началом лабораторной работы необходимо:

- 1) освоить правила техники безопасности, приведенные в утвержденной Университетом инструкции;
- 2) пройти проверку знаний о порядке выполнения лабораторной работы и технике безопасности (ТБ) у преподавателя, проводящего занятие.

## **3. Общие требования по технике безопасности**

К работе в лаборатории допускаются только студенты, ознакомившиеся с типовой инструкцией и настоящими требованиями по ТБ, прошедшие проверку знаний и расписавшиеся в журнале регистрации инструктажа.

В лаборатории нужно занимать только указанные преподавателем стенды и пользоваться только теми приборами и установками, которые необходимы для выполнения заданной работы.

Студентам запрещено включать главные выключатели или работать не на своем рабочем месте.

**Перед началом работы:**

- получить у преподавателя требующиеся для работы приборы и аппаратуру;

- ознакомиться с предупредительными надписями и другими указаниями на рабочем месте;

- привести свое рабочее место в порядок и исключить возможность прикосновения к неизолированным токоведущим частям.

**В процессе работы необходимо:**

- провода разместить так, чтобы они по возможности меньше пересекались между собой, схема была наглядной и легко читалась;

- вести наблюдение за реостатами, регуляторами и проводами, чтобы они не перегрелись и не возникло короткого замыкания;

- собранная для эксперимента схема проверяется студентами по принципу взаимопроверки. Включать напряжение можно только после разрешения руководителя занятиями;

- студент, подающий на установку напряжение, громко предупреждает остальных словами: «Подаю напряжение!»;

- после подачи напряжения категорически запрещается:

- а) прикасаться к неизолированным частям стенда;

- б) производить в схеме пересоединения;

- в) оставлять рабочее место;

- при необходимости изменений в схеме напряжение необходимо отключить. Подавать напряжение снова разрешается только после получения разрешения руководителя занятиями;

- в аварийном случае и в случае исчезновения в питающей сети напряжения установка должна быть немедленно отключена от сети, а преподаватель поставлен об этом в известность;

- запрещается ходить от одного рабочего места к другому, мешать другим студентам разговорами и вмешиваться в их работу.

При несоблюдении настоящих требований студент удаляется с занятия.

**После выполнения эксперимента:**

- 1) отключить на щитке рабочего места напряжение, а затем:

- а) представить результаты эксперимента преподавателю;

- б) после подтверждения преподавателем результатов эксперимента разобрать схему и сдать рабочее место;

- 2) о неисправности приборов и аппаратов, замеченной во время работы, сообщить руководителю занятий;

- 3) покинуть лабораторию студенты имеют право, когда рабочее место принято преподавателем и получено разрешение на прекращение работ.

# ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА

## 1. Общие положения

Отчет выполняется один на бригаду, он должен содержать:

- титульный лист;
- введение;
- краткие теоретические сведения;
- основная часть;
- заключение;
- краткие ответы на контрольные вопросы;
- список использованных источников.

Оформление отчета должно соответствовать ГОСТу [1].

## 2. Требования к содержанию структурных элементов отчета

Пример оформления титульного листа представлен в приложении А.

Введение должно содержать цель и задачи работы, краткое изложение ее сути (всех этапов ее выполнения).

В кратких теоретических сведениях приводятся:

- пояснения, необходимые для уточнения или установления терминов, используемых в отчёте;
- перечень обозначений и сокращений, применяемых в отчёте;

В основную часть входит:

- описание экспериментальных исследований (краткое изложение результатов, экспериментальные результаты в табличной и графической форме).

- обобщение и оценка результатов (оценка полноты решения поставленной задачи, качественная и количественная оценка полученных результатов).

Заключение содержит краткие выводы по результатам работы и оценку полноты решения поставленных задач.

Сведения об использованных источниках приводятся в соответствии с ГОСТом [2].

РАБОТА № 1

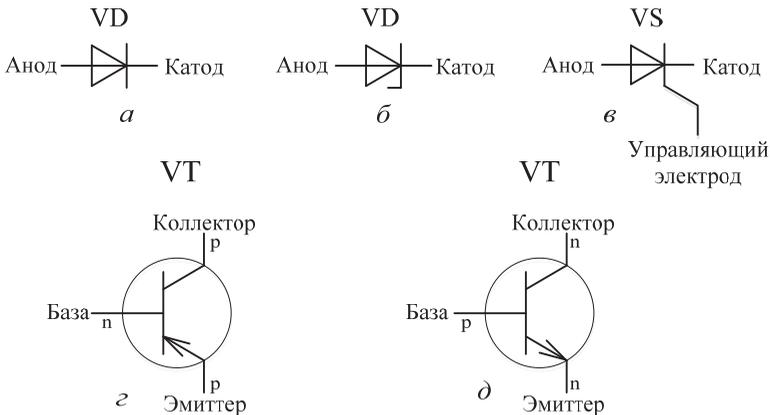
**ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ КЛЮЧЕЙ**

**1.1. Цель работы**

Получить навыки работы в программной среде схемотехнического моделирования Micro-Cap, изучить назначение и исследовать принципы работы электронных полупроводниковых ключей.

**1.2. Основные теоретические сведения**

В электронных аппаратах основным элементом, управляющим потоком электрической энергии, являются коммутирующие бесконтактные (статические) электронные ключи (ЭК), рис. 1.1. Функции ЭК в настоящее время выполняют силовые полупроводниковые приборы (СПП).



*Рис. 1.1. Условное графическое обозначение:*

*а* – выпрямительный диод; *б* – односторонний стабилитрон; *в* – обычный SCR-тиристор; *г* – биполярный PNP-транзистор; *д* – биполярный NPN-транзистор

ЭК работают в двух явно выраженных состояниях – включенном, соответствующем высокой проводимости, и выключенном, соответ-

ствующем низкой проводимости. Физической основой ЭК являются различные полупроводниковые структуры. Управление электронной проводимостью позволяет осуществлять бездуговую коммутацию электрических цепей.

СПП можно классифицировать по различным признакам: принципу действия, применению и др.

**По способу бездуговой коммутации** электрической цепи ЭК имеют следующую классификацию:

- бесконтактный ЭК – обеспечивает бездуговую коммутацию цепи, выполняется на базе СПП;
- гибридный ЭК – отличается от бесконтактного тем, что в нем наряду с полупроводниковой схемой используются механические контакты, позволяющие путем шунтирования полупроводниковой схемы снизить потери энергии.

**По принципу действия** СПП разделяются на три основных вида: диоды, транзисторы, тиристоры и подразделяются на группы, определяемые особенностями исполнения, характером физических процессов и др.

СПП классифицируются **по степени управляемости**, т. е. возможности перевести прибор из проводящего состояния в непроводящее и обратно:

- *неуправляемые* – их состояние определяется полярностью и величиной приложенного к ним напряжения, к этой группе относятся диоды всех типов;
- *не полностью управляемые* – с помощью сигнала управления их можно переводить в проводящее состояние, а для перевода в непроводящее состояние требуется помимо снятия управляющего сигнала обеспечить снижение протекающего через прибор тока ниже определенного порогового значения, например, широко распространенные обыкновенные SCR-тиристоры;
- *полностью управляемые* – можно переводить в проводящее состояние и обратно сигналом управления малой мощности (например, транзисторы или запираемые тиристоры). Сигнал управления формируется электронным устройством (формирователем), входящим в состав системы управления (СУ) аппарата, преобразователя или другого устройства, содержащего ЭК. Такое устройство в технической литературе называют «драйвером» (англ. driver), его основная функция заключается в формировании сигнала управления малой мощности, необходимого для включения или выключения ЭК. Функционально драйвер аналогичен приводу электромеханического коммутационного аппарата.

**По роду тока** полупроводниковые ЭК подразделяются:

- на ЭК переменного тока – выполняются, как правило, на базе двух встречно-параллельно включенных тиристоров либо одного симистора, реже используется для этой цели тиристор, шунтируемый в обратном направлении диодом;
- ЭК постоянного тока – выполняются либо на базе SCR-тиристора со схемой принудительной емкостной коммутации, либо запираемых тиристоров (GTO и GCT-тиристоры), а также на базе биполярных транзисторов NPN- и PNP-проводимости, биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзисторы) и полевых транзисторов (МОП- или MOSFET-транзисторы).

Полупроводниковые ЭК также классифицируются по рабочей частоте (низкочастотные, высокочастотные, импульсные и др.), по коммутируемой мощности (малой, средней, большой). Внутри отдельных классов ЭК различаются по основным параметрам, например, по значению и полярности выдерживаемых напряжений, допустимым токам и другим характерным признакам.

СПП имеет два характерных режима работы: статический и динамический.

Статическим режимом работы называется режим в одном из состояний: выключенном или включенном. Этот режим наступает после завершения процесса коммутации. Одной из основных характеристик ЭК в статических режимах является статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ). Физические явления, сопутствующие состояниям проводимости СПП, влияют на статические ВАХ, которые существенно уступают аналогичным характеристикам электромеханических контактов. Во-первых, СПП обладают односторонней проводимостью и, как правило, способны блокировать напряжение одной полярности. Во-вторых, у большинства СПП в состоянии высокой проводимости имеется прямое напряжение не менее 0,7...1,5 В, обусловленное контактной разностью потенциалов на границе полупроводниковых слоев с различными типами проводимости. Кроме того, через СПП в выключенном состоянии продолжают протекать остаточные токи, механизм возникновения и значение которых зависит от типа прибора, температуры, приложенного напряжения и др.

Динамическими режимами работы называют режимы ЭК в процессе перехода из одного состояния в другое. Протекающие при этом электромагнитные процессы называются переходными. Одной из важных характеристик ЭК в динамических режимах является динамическая

ВАХ – зависимость тока от напряжения при включении и напряжения от тока при выключении. Общее время переключения зависит от быстродействия ЭК и является одним из важнейших параметров. Быстродействие СПП существенно превышает быстродействие электромеханических коммутационных аппаратов. Динамические характеристики ЭК близки к идеальным, а бездуговая коммутация позволяет обеспечить практически неограниченный ресурс их работы. Однако реализация этих возможностей зависит от внутренних параметров СПП и параметров коммутируемой цепи.

Управление мощными электрическими процессами – именно та задача, при решении которой широко используются ЭК во всех областях техники, а интенсивность их применения быстро возрастает. Это объясняется достоинствами СПП, основными из которых являются: бездуговая коммутация электрических цепей; высокое быстродействие; малое падение напряжения в открытом состоянии и малый ток в закрытом состоянии (что обеспечивает малые потери мощности); высокая надежность; значительная нагрузочная способность по току и напряжению; малые размеры и вес; простота в управлении; единство с устройствами информационной электроники, что облегчает объединение сильноточных и слаботочных элементов.

### **1.3. Программа работы**

1. Ознакомиться с видами, назначением, принципами работы, основными параметрами полупроводниковых электронных ключей.
2. Исследовать работу однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
3. Исследовать работу одностороннего стабилитрона.
4. Исследовать условия управления SCR-тиристором.
5. Исследовать передаточную характеристику схемы включения биполярного транзистора с общим эмиттером.
6. Выполнить анализ результатов исследований принципов работы полупроводниковых ключей и сформулировать выводы по работе.
7. Оформить отчет.

### **1.4. Порядок выполнения работы**

1. Включить компьютер, после его загрузки из главного меню запустить программу Micro-Cap.

2. Моделирование в программе Micro-Cap происходит в два этапа:

- первый этап – сборка модели схемы и настройка параметров ее элементов;
- второй этап – настройка параметров построения диаграмм и запуск симуляции.

Ниже представлен процесс моделирования в Micro-Cap на примере схемы однополупериодного выпрямления переменного напряжения.

**Первый этап.** Моделирование схемы однополупериодного выпрямления и настройка элементов схемы.

Сборку модели схемы (рис. 1.2) осуществляем последовательным перемещением компонентов из библиотек на рабочее поле программы<sup>1</sup>. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

1. Находим в библиотеке компонентов источник синусоидального напряжения – подводим курсор мыши к выпадающему меню «Компоненты», выбираем строку «Analog Primitives» (Аналоговые примитивы), далее строку «Waveform Sources» (Источники сигналов), далее строку «Sine Source» (Синусоидальный источник) и нажатием левой кнопки мыши осуществляем выбор (рис. 1.3).

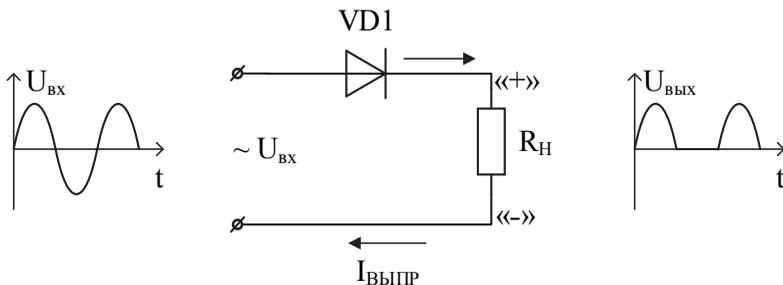


Рис. 1.2. Схема однополупериодного выпрямления

2. Помещаем курсор с изображением источника напряжения в любое место рабочего поля и нажатием левой кнопки мыши производим размещение выбранного компонента.

---

<sup>1</sup> Для поворота компонента выделить его нажатием левой кнопки мыши и нажать правую кнопку мыши (до отпущения левой кнопки) или сочетанием клавиш «Ctrl+R». Для упрощения построения схемы на экран рекомендуется нанести координатную сетку – подвести курсор к кнопке «Grid» на панели инструментов и нажать левую кнопку мыши.

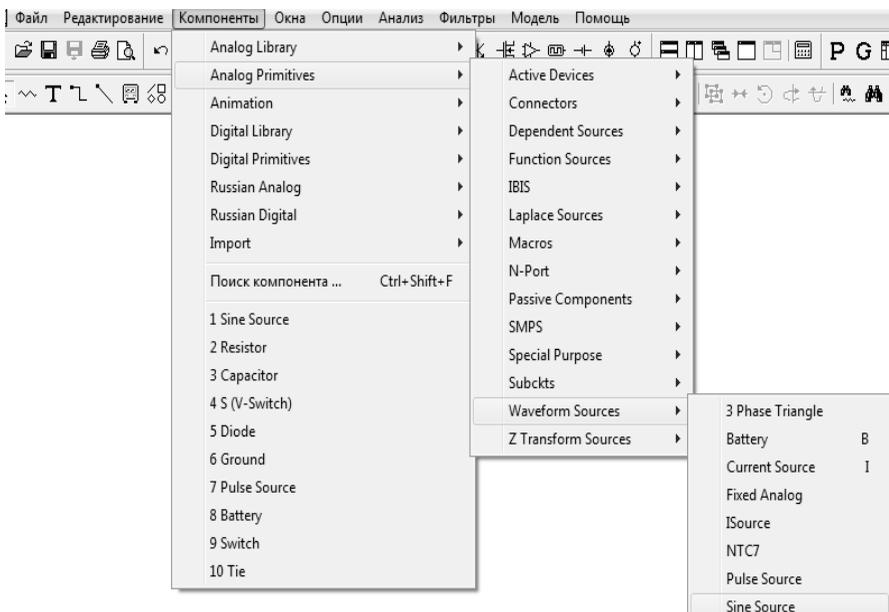


Рис. 1.3. Выбор источника синусоидального напряжения

3. Отпускаем левую кнопку мыши и фиксируем компонент на схеме. Одновременно с отпусканием левой кнопки мыши открывается окно ввода и редактирования атрибутов элемента.

4. Настраиваем атрибуты модели элемента таким образом, чтобы она соответствовала источнику синусоидального напряжения  $\sim 220$  В, 50 Гц (см. рис. 1.4 и таблицу). Значение частоты ввести в поле **F** (Frequency), а напряжения – в поле **A** (Amplitude), остальные поля оставить без изменения<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Размерности параметров не указываются. Отображение имени и значения атрибута источника на схеме задается с помощью отметок в виде маркеров на панели управления **Display**. Сохранение установленных атрибутов осуществляется после нажатия кнопки «OK». Для редактирования уже установленных в схему компонентов достаточно подвести курсор мыши к его изображению и двойным нажатием левой кнопки мыши раскрыть окно для задания новых значений атрибутов.

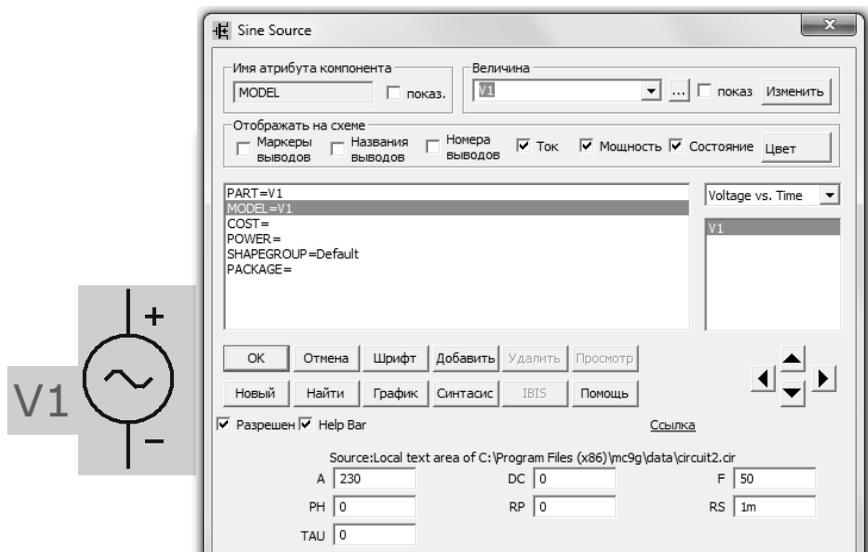


Рис. 1.4. Окно задания атрибутов источника<sup>3</sup>

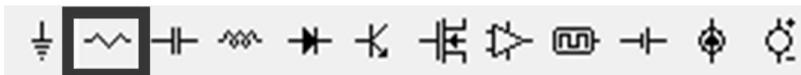
### Сокращения в номиналах элементов

Название	Чтение	Множитель
meg	мега	$10^6$
k	кило	$10^3$
m	милли	$10^{-3}$
u	микро	$10^{-6}$
n	нано	$10^{-9}$
p	пико	$10^{-12}$

*Примечание: данные сокращения ставятся без пробела после числа. Например, у конденсатора: 10u – 10 микрофарад, а 10 u – ошибка, Micro-Cap будет воспринимать как 10 фарад.*

<sup>3</sup> Каждый компонент имеет минимальный набор атрибутов, к которым относится позиционное обозначение **PART** и номинальное значение параметров **VALUE**. Количество атрибутов определяется типом компонента.

5. На панели часто используемых компонентов выбираем «**Resistor**» и устанавливаем его на рабочем поле:



6. Атрибуту величины сопротивления «**RESISTANCE**» присваиваем значение 100 Ом. С помощью атрибута «**SHAPEGROUP**» можно изменить условно-графическое обозначение резистора на европейское, выбрав из выпадающего меню «Величина» строку «**Euro**» (рис. 1.5).

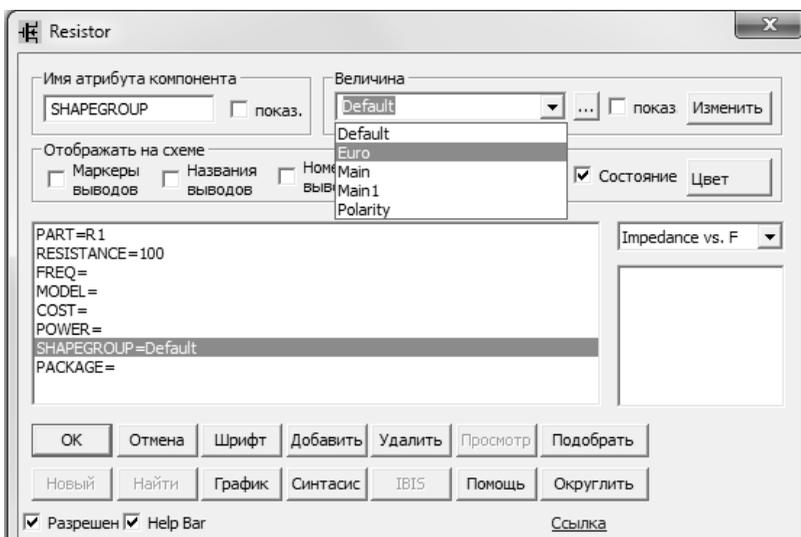
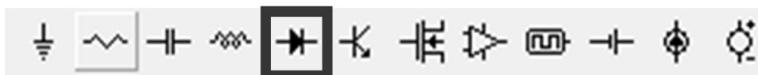


Рис. 1.5. Окно задания атрибутов резистора нагрузки

7. На панели часто используемых компонентов выбираем модель диода «**Diode (D)**» и устанавливаем его на рабочем поле:



8. В окне задания атрибутов для атрибута «**MODEL**» в списке моделей справа выбрать модель диода «**\$GENERIC**» (рис. 1.6).

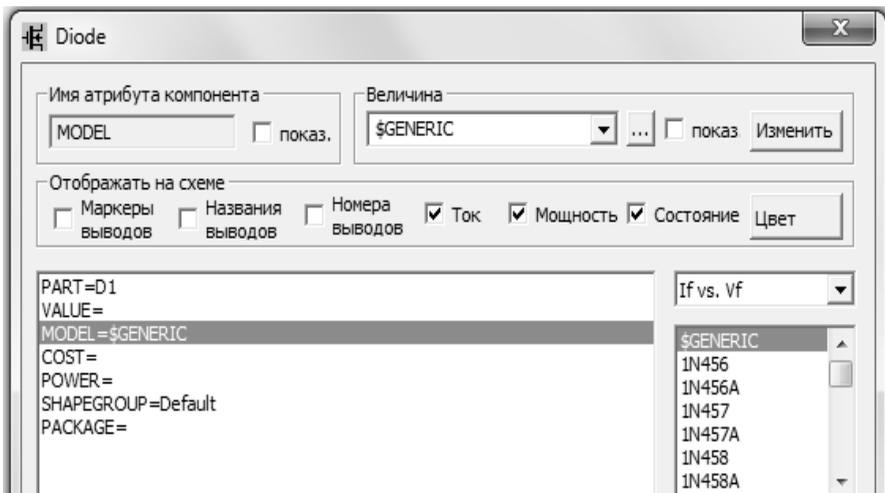
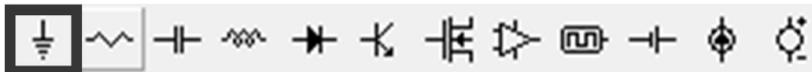


Рис. 1.6. Настройка атрибутов диода

9. На панели часто используемых компонентов нажимаем на иконку заземление «**Ground (G)**» и устанавливаем ее ниже источника напряжения:



10. Переключаемся на режим ортогонального соединения элементов проводами:



11. Выполняем соединение элементов в схему посредством нажатия левой кнопки мыши на выводе одного элемента, перемещения курсора к выводу второго элемента и отпускания левой кнопки мыши. После размещения и соединения компонентов средствами программы получаем схему, подобную изображенной на рис. 1.7.

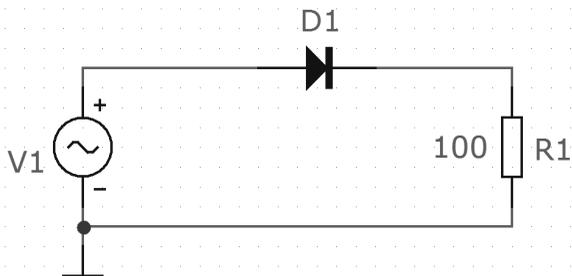
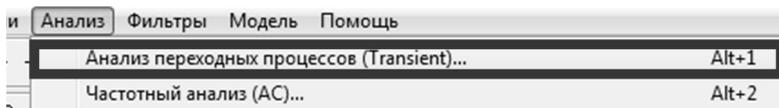


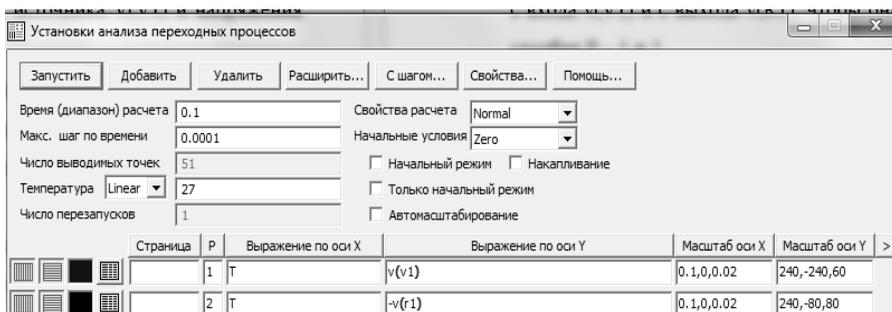
Рис. 1.7. Модель схемы однополупериодного выпрямления переменного напряжения

**Второй этап.** Установка параметров моделирования и запуск на счет.

1. Вызываем интерфейс получения временных диаграмм – из выпадающего меню «Анализ» выбираем строку «Анализ переходных процессов (Transient)»:



2. Открывается интерфейс «Установки анализа переходных процессов», где выполняем настройку следующим образом:



**Время (диапазон) расчета** – длительность интервала времени (в секундах) анализа переходного процесса. В нашем случае установлено конечное время для моделирования 0,1 с.

**Макс. шаг по времени** – максимальный шаг интегрирования<sup>4</sup>. В нашем случае шаг интегрирования установлен 0,0001 с.

**Выражение по оси X** – имя переменной, откладываемой по оси X. В нашем случае откладываем время (переменная T).

**Выражение по оси Y** – математическое выражение переменной, откладываемое по оси Y. В нашем случае это простая переменная напряжения источника V(V1) и напряжения на резисторе V(R1).

**Масштаб по оси X** – максимальное и минимальное значения переменной T (с). В нашем случае запись 0.1,0,0.02 означает: максимальное значение переменной времени на графике – 0,1 с, минимальное значение переменной времени на графике – 0 с, шаг сетки на графике – 0,02 с.

**Масштаб по оси Y** – максимальные и минимальные значения переменных на графике. В нашем случае запись 240,-240,60 означает: максимальное значение напряжения на графике 240 В, минимальное значение напряжения на графике –240 В, шаг сетки на графике 60 В.

**Свойства расчета=Normal** – выполнение моделирования без сохранения данных.

**Начальные условия=Zero** – установка нулевых начальных условий для потенциалов узлов и токов через индуктивность.

**Начальный режим** – выполнение расчета режима по постоянному току перед началом каждого расчета переходных процессов. В нашем случае опция отключена (флажок снят).

**Только начальный режим** – расчет только для режима по постоянному току. В нашем случае опция отключена (флажок снят).

**Автомасштабирование** – автоматическое масштабирование<sup>5</sup>. В нашем случае опция отключена (флажок снят).

Нажатием на кнопку «ЗАПУСТИТЬ» выполняется расчет. Начало численного расчета совпадает с временем включения источника на

---

<sup>4</sup> С уменьшением шага интегрирования процесс моделирования затягивается, однако позволяет визуально наблюдать за ходом численного расчета. Следует также иметь в виду, что с увеличением максимального шага интегрирования можно получить графики, искажающие суть протекающих процессов.

<sup>5</sup> В случае сложностей в установке масштабов по осям X и Y рекомендуется при первом моделировании включить опцию автоматического масштабирования, а затем отключить ее, чтобы произвести корректировку масштабов вручную.

входе схемы<sup>6</sup>. Завершение режима анализа и возвращение в окно редактора схемы осуществляется с помощью выпадающего меню «Анализ переходных процессов>Выйти из анализа» или клавишей «F3».

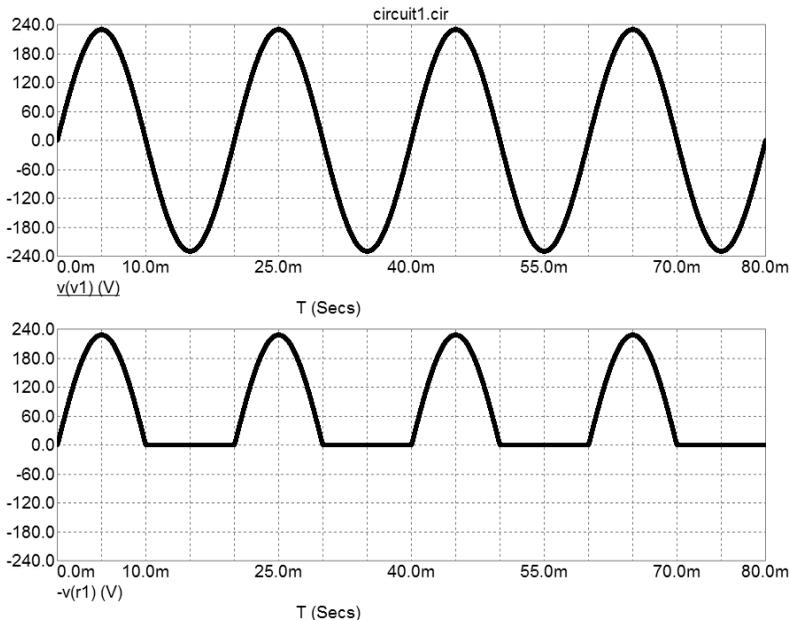


Рис. 1.8. Временные диаграммы напряжения на входе и выходе однополупериодного выпрямителя

Аналогично представленному процессу моделирования в Micro-Cap выполнить следующее.

1. *Исследовать работу двухполупериодного выпрямителя.* Для этого выполнить моделирование схемы, рис. 1.9 (модель диодов, составляющих мост носит название «D45»), получить временные диаграммы с входа  $v(V1)$  и с выхода  $v(R1)$ , чтобы они были на двух разных графиках.

---

<sup>6</sup> Для изменения параметров моделирования достаточно нажать на кнопку «Параметры анализа» или клавишу «F9», что позволяет вернуться в окно задания параметров моделирования.

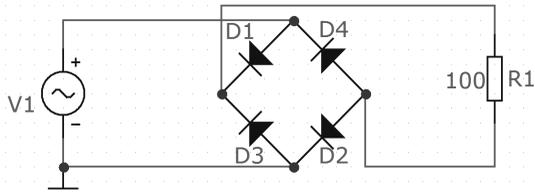


Рис. 1.9. Модель схемы двухполупериодного выпрямления

2. Исследовать работу одностороннего стабилитрона, для этого:

- составить модель схемы, представленную на рис. 1.10. Модель стабилитрона носит название **Zener** и расположена в библиотеке «аналоговые примитивы»>>«пассивные компоненты». В окне атрибутов D1 выбрать одну из моделей стабилитрона по заданию преподавателя;

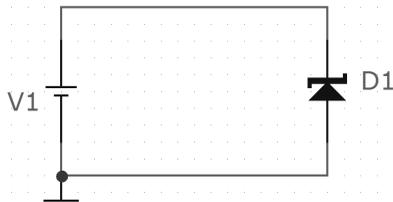


Рис. 1.10. Модель исследования стабилитрона

- включить «Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)» из выпадающего меню «Анализ». В окне «Установки динамического DC анализа» нажать кнопку «Токи» (рис. 1.11);

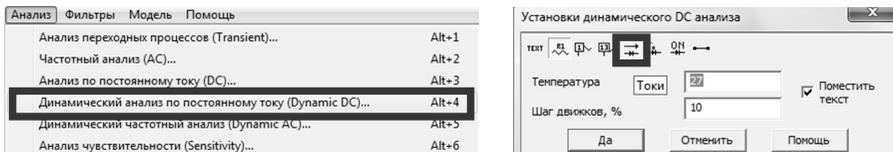


Рис. 1.11. Настройки для исследования работы стабилитрона

- при изменении величины напряжения V1 фиксировать значения обратного тока стабилитрона. Построить обратную ветвь ВАХ стабилитрона.

3. *Определить условия включения и выключения SCR-тиристора, для этого:*

- открыть файл «**SCR-Tyristor.cir**» с моделью для исследования, рис. 1.12;
- при изменении величины сопротивления резистора R3 от 40 до 1 Ом выполнить «**Анализ переходных процессов**», определить величину тока управления, необходимого для отпирания тиристора VS1;
- установить необходимый ток управления, определенный в предыдущем пункте. При изменении сопротивления R4 от 2 до 0,1 Ом добиться выключения тиристора VS1 в момент его шунтирования ключом SW2 (ключ настроен на замыкание по истечении трех секунд);

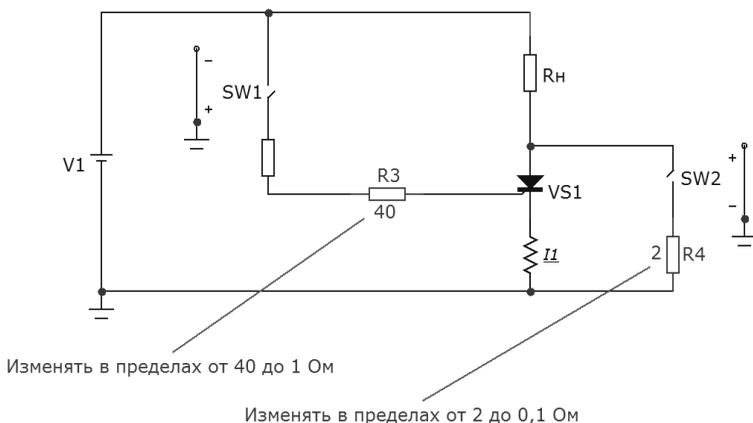


Рис. 1.12. Модель для исследования тиристора

- сформулировать условия включения и выключения тиристора.

4. *Исследовать передаточную характеристику схемы включения биполярного транзистора с общим эмиттером:*

- открыть файл «**BJT-Tranzistor.cir**» с моделью включения биполярного транзистора с общим эмиттером (рис. 1.13);
- включить «**Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)**» из выпадающего меню «**Анализ**». В окне «**Установки динамического DC анализа**» нажать кнопку «**Токи**» (см. рис. 1.11);
- получить у преподавателя задание по настройке схемы;
- при уменьшении величины сопротивления резистора R1 получить по 10-15 точек измерения токов база-эмиттер и коллектор-

эмиттер. Первую точку получить при напряжении V1 0 В. При переходе из активного режима (линейное нарастание тока К-Э в зависимости от тока Б-Э) в режим насыщения (ток К-Э почти не изменяется при увеличении тока Б-Э) увеличить количество точек измерения;

- построить характеристику прямой передачи по току  $I_k = f(I_b)$  и отметить режимы: отсечки (состояние низкой проводимости), активный (режим усиления), насыщения (состояние высокой проводимости).

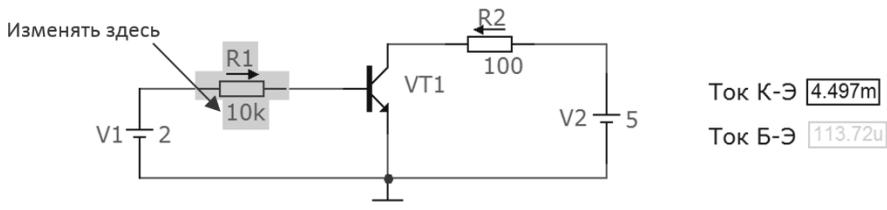


Рис. 1.13. Модель схемы биполярного транзистора с общим эмиттером

3. В завершение работы должен быть выполнен анализ результатов исследования полупроводниковых ключей, сформулированы выводы по работе и оформлен отчет.

### Контрольные вопросы

1. Назначение и функции электронных ключей.
2. Статический и динамический режим работы электронного ключа.
3. Классификация электронных ключей по способу бездуговой коммутации электрической цепи.
4. Отличительные особенности электронных ключей постоянного и переменного тока.
5. Классификация электронных ключей по степени управляемости.
6. Принцип работы стабилитрона. Основные параметры выбора стабилитронов.
7. Условные графические обозначения полупроводниковых ключей разных видов.
8. Условия включения и выключения SCR-тиристора. Основные параметры выбора SCR-тиристора.
9. Принцип работы биполярного транзистора.
10. Основные параметры выбора биполярных транзисторов.

## РАБОТА № 2

# ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА

### 2.1. Цель работы

Изучить принципы управления полупроводниковыми ключами, исследовать работу электронного коммутационного аппарата на примере тиристорного таймера.

### 2.2. Основные теоретические сведения

Электронные коммутационные аппараты предназначены для включения и отключения электрических цепей посредством силовых ЭК. Примером таких аппаратов служат электронные реле и контакторы с функциями, аналогичными для электромеханических аппаратов. В таком применении используемые в них СПП могут рассматриваться как прерыватели с относительно редкой коммутацией.

ЭК в импульсных регуляторах работают, как правило, в режиме периодической коммутации на повышенных частотах. Однако в отдельных случаях электронный аппарат совмещает функции коммутирующего и регулирующего устройства. Электронные и электромеханические ключи существенно различаются по следующим показателям:

- возможностям и способам отвода теплоты при коммутационном процессе;
- управлению коммутационным процессом;
- стойкости к перегрузкам по току и перенапряжениям;
- количеству коммутаций;
- наличию гальванической развязки между цепями источника, нагрузки и управления.

Эти показатели определяют рациональные области и эффективность использования того или иного вида ключа.

При переходе ЭК из одного состояния в другое (включенное или выключенное) в нем выделяется энергия, которая зависит от динамической ВАХ и характера нагрузки. Так, при быстром отключении активно-индуктивной цепи практически вся энергия, накопленная в индуктивной составляющей, переходит в ЭК. В электромеханическом ключе эта энергия обуславливает дугообразование с последующим

переходом в теплоту. В ЭК дугообразование отсутствует, и энергия выделяется непосредственно в кристалле полупроводникового прибора, сопровождая возникновение недопустимых перенапряжений или токовых перегрузок. В результате возможен выход СПП из строя.

Повышенная стойкость электромеханического ключа по сравнению с ЭК к токовым перегрузкам и перенапряжениям вытекает из принципа действия и конструктивных исполнений ключей.

Возможность реализации коммутационных аппаратов на базе СПП с управлением коммутационными процессами следует из быстродействия ЭК и способности некоторых из них работать с плавным регулированием проводимости (транзисторы). Быстродействие ЭК позволяет обеспечить импульсное регулирование на повышенных частотах и напряжениях в коммутируемой цепи. Более подробно ознакомиться с принципами импульсного регулирования можно по специальной литературе [3].

Отсутствие подвижных механических частей и дуговых явлений практически снимает ограничения на допустимое количество коммутаций, что является существенным преимуществом ЭК.

Наличие гальванической развязки между цепями источника электропитания, нагрузки и управления в ряде случаев оказывается решающим фактором, влияющим на выбор аппарата. В электромеханических аппаратах гальваническая развязка обусловлена принципом действия самого аппарата. В электронных аппаратах обеспечение гальванической развязки усложняет их схемотехнику.

Параметры коммутируемой цепи определяют вид ЭК. Реле и контакторы средней мощности выполняются на транзисторах. Для коммутации цепей с повышенными значениями напряжений и токов в цепях постоянного тока в качестве ключевых элементов используют тиристоры.

Обыкновенный SCR-тиристор является силовым электронным не полностью управляемым ключом. Тиристор имеет четырехслойную *p-n-p-n*-структуру с тремя выводами: анод, катод и управляющий электрод. Сигналом управления переводится только в проводящее состояние (включенное). Тиристор способен выдерживать как прямое, так и обратное напряжение, не переходя в проводящее состояние. Тиристор проводит прямой ток при подаче на него прямого напряжения и импульса тока управления, а выключается после падения прямого тока ниже порога отключения и восстановления запирающей способности.

Существующие схемы принудительного выключения тиристорov разделяют на две группы: запираемые обратным напряжением и запираемые импульсом обратного тока. В первой группе схем в качестве источника напряжения используется предварительно заряженный конденсатор, во второй – импульс тока формируется при разряде предварительно заряженного конденсатора в колебательном LC-контуре.

### **2.3. Программа работы**

1. Изучить устройство и принцип работы схемы тиристорного таймера.
2. Выполнить моделирование схемы тиристорного таймера (рис. 2.1) в Micro-Cap, используя методику лабораторной работы № 1.
3. Построить временные диаграммы, поясняющие принцип работы основных элементов схемы тиристорного таймера.
4. Обеспечить выдержки времени тиристорного таймера, заданные преподавателем.
5. Сформулировать выводы по проделанной работе.
6. Оформить отчет.

### **2.4. Описание схемы тиристорного таймера**

Модель схемы тиристорного таймера представлена на рис. 2.1. В исходном состоянии тиристор VS1 заперт, как и остальные активные элементы устройства (транзисторы). Устройство не потребляет ток от источника питания.

При нажатии на кнопку SB1 («Пуск») конденсатор C1, если он до этого имел заряд (при первом включении заряд отсутствует), разряжается через диод VD1. Одновременно на управляющий электрод тиристора VS1 через R1 подается отпирающий сигнал управления, величина тока управляющего сигнала определяется значением величины напряжения источника питания и отношением значений сопротивлений делителя напряжения на резисторах R1 и R2. Тиристор VS1 переходит в проводящее состояние и через сопротивление нагрузки R9 начинает протекать ток (по контуру +V1, R9, VD3, VS1, -V1). Одновременно с этим времязадающий конденсатор C1 начинает заряжаться по контуру +V1, C1, R3, R4, VS1, -V1. Скорость заряда конденсатора определяется значением сопротивления зарядного контура и величиной емкости конденсатора.

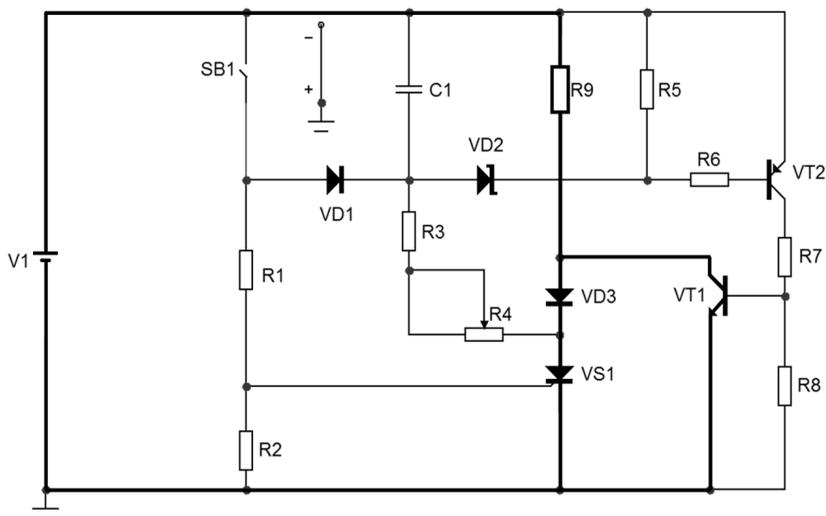


Рис. 2.1. Модель схемы тиристорного таймера

Когда значение напряжения на обкладках конденсатора  $C1$  превысит величину напряжения пробоя стабилитрона  $VD2$ , ток через него (контур  $+C1$ , переход эмиттер-база  $VT2$ ,  $R6$ ,  $VD2$ ,  $-C1$  и контур  $+C1$ ,  $R5$ ,  $VD2$ ,  $-C$ ) открывает переход эмиттер-база транзистора  $VT2$ . Соответственно через  $VT2$  подается сигнал управления для транзистора  $VT1$  и он переходит в проводящее состояние (величина тока сигнала управления определяется значением напряжения источника  $V1$  и значением сопротивления  $R7$ , а напряжение сигнала определяется значением напряжения источника  $V1$  и отношением значения сопротивлений делителя напряжения на резисторах  $R7$  и  $R8$ ). Транзистор  $VT1$  шунтирует цепочку из тиристора  $VS1$  и диода  $VD3$ . Транзистор  $VT1$  подбирается таким образом, чтобы значение падения напряжения на нем в открытом состоянии было ниже величины падения напряжения на цепочке из тиристора  $VS1$  и диода  $VD3$  (чтобы обеспечить при шунтировании снижение тока через тиристор  $VS1$  ниже порогового значения для запираения), что равнозначно прерыванию тока через тиристор  $VS1$ . Следовательно, тиристор  $VS1$  запирается. Процесс зарядки конденсатора  $C1$  прекращается, напряжение на  $C1$  понижается настолько, что стабилитрон  $VD2$  перестает проводить ток. Это приводит к запираению транзисторов  $VT2$  и  $VT1$ . Схема переходит в исходное состояние и готова к очередному включению.

## 2.5. Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер, после его загрузки из главного меню запустить программу Micro-Cap.

2. Собрать модель схемы тиристорного таймера, изображенной на рис. 2.1. Параметры для настройки элементов приведены в табл. 2.1. Элементную базу выбирать из библиотеки «**Analog Primitives**» в соответствии с табл. 2.2.

Таблица 2.1

Параметры элементов схемы

Элемент	V1	SB1	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	C1
Значения	9	T,1,1.5	1k	10k	1k	25k	300k	1k	10	10k	5	200u

*Примечание: Интервал экспозиций таймера определяется постоянной времени  $\tau = C1(R3+R4)$  и составляет для указанных номиналов 1...20 с.*

Таблица 2.2

Выбор элементной базы

Элемент схемы	R4	VD1	VD2	VD3	VS1	VT1	VT2
Название модели	<i>Pot</i>	<i>Diode</i>	<i>Zener</i>	Diode	<b>SCR</b>	<b>PNP</b>	<i>PNP</i>
Имя набора атрибутов		\$GENERIC	1N4730	UTX225	<b>см. пункты 3 и 4</b>		\$GENERIC

3. Настроить параметры тиристора VS1:

- отпирающий постоянный ток управления  $I_{GT}$  – в соответствии с действующим значением тока управления, определяемым величиной напряжения источника питания и значениями сопротивлений R1 и R2;

- ток удержания в открытом состоянии  $I_H$  – в соответствии с действующим значением тока, протекающего через VS1 после его шунтирования транзистором VT1 (определяется величиной напряжения коллектор-эмиттер и значением сопротивления перехода коллектор-эмиттер в открытом состоянии).

4. Подобрать транзистор VT1, причем за главный критерий выбора принять минимальное значение сопротивления перехода коллектор-эмиттер ( $R_C + R_E$ ), которое должно соответствовать требуемой доле тока, отводимого от VS1 для его запираения. В приложении Б приведена расшифровка атрибутов для биполярного транзистора.

5. Получить временные диаграммы токов и напряжений, поясняющие принцип работы основных элементов схемы тиристорного таймера (рис. 2.2). Минимальный набор диаграмм должен включать:

- а) ток нагрузки (R9);
- б) напряжение на конденсаторе C1;
- в) ток через тиристор VS1 и ток через шунтирующий транзистор VT1;
- г) ток сигнала управления тиристором VS1;
- д) ток через стабилитрон VD2.

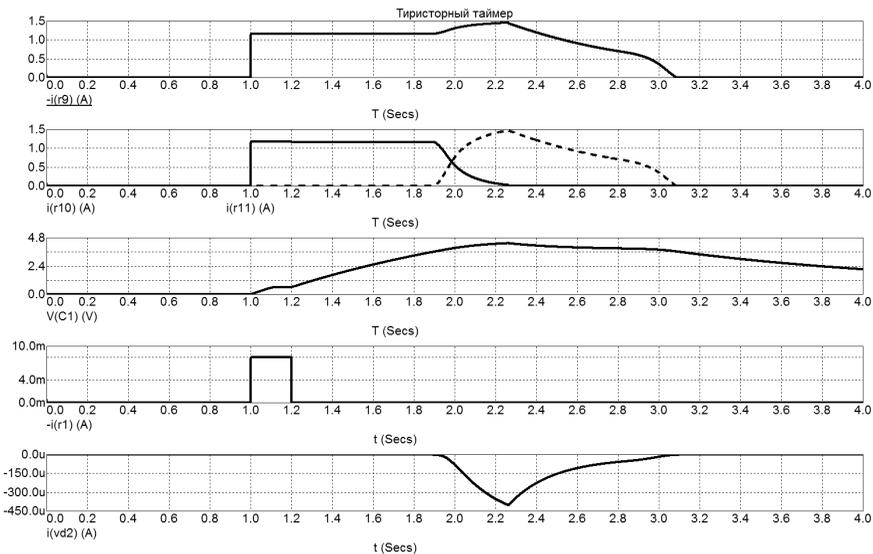


Рис. 2.2. Временные диаграммы работы тиристорного таймера

**Рекомендация:** на некоторых типах компонентов программа *Мi-сто-Сар* не позволяет выполнять непосредственные измерения величины токов и напряжений, поэтому для снятия диаграмм рекомендуется устанавливать в интересующие ветви схемы резисторы с низким (для измерения токов) или высоким (для измерения напряжения) сопротивлением.

6. Настроить величину сопротивления потенциометра R4, чтобы обеспечить величину выдержки времени тиристорного таймера, заданную преподавателем.

7. Выполнить анализ результатов исследования, сформулировать выводы по работе и оформить отчет.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы схемы тиристорного таймера.
2. Чем обусловлена неравномерность тока нагрузки в рассмотренной схеме тиристорного таймера?
3. Параметры выбора SCR-тиристорov и биполярных транзисторов на примере рассмотренной схемы тиристорного таймера.
4. Какие параметры определяют время включения и время выключения тиристорного таймера?
5. Назначение и способы гальванической развязки между цепями источника электропитания, нагрузки и управления.
6. Естественная и искусственная коммутация SCR-тиристора. Объяснить принципы принудительного выключения (коммутации) SCR-тиристора.
7. Объяснить принцип работы SCR-тиристора на основе его вольт-амперной характеристики.
8. Достоинства и недостатки электронных коммутационных аппаратов на основе SCR-тиристорov.
9. Сравнительный анализ показателей эффективности использования электронных и электромеханических коммутационных аппаратов.
10. Назначение и область использования электронных коммутационных аппаратов.

## РАБОТА № 3

# ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

### 3.1. Цель работы

Изучить принцип работы электронного реле времени. Исследовать влияние параметров коммутируемой цепи на время выдержки электронного реле времени.

### 3.2. Основные теоретические сведения

Параметры коммутируемой цепи определяют вид ЭК. Реле и контакторы постоянного тока средней мощности преимущественно выполняются на транзисторах.

В зависимости от сигнала управления транзистор может находиться в закрытом (низкая проводимость) или открытом (высокая проводимость) состоянии. В закрытом состоянии транзистор способен выдерживать прямое напряжение, определяемое внешними цепями, при этом ток транзистора имеет малое значение. В открытом состоянии транзистор проводит ток, определяемый значениями параметров внешних цепей, при этом напряжение между его выводами мало. Транзисторы не способны проводить ток в обратном направлении и не выдерживают обратного напряжения.

Функцию транзисторного коммутатора может выполнять простейший транзисторный усилитель, выполненный по схеме с общим эмиттером, представленной на рис. 3.1, *а*. В этой схеме транзистор VT должен работать в ключевом режиме. Управление осуществляется подачей на базу сигнала управления  $U_y$ , который создает базовый ток  $I_b$ , обеспечивающий при заданной нагрузке  $R_n$  режим насыщения транзистора во включенном состоянии. Для скачкообразного перехода транзистора из одного состояния в другое и наоборот сигнал управления должен изменяться скачкообразно (рис. 3.1, *б*). При более плавном изменении сигнала управления переход транзистора из одного состояния в другое затягивается (рис. 3.1, *в*). В результате возрастает время включения ( $t_{\text{вкл}}$ ) и выключения ( $t_{\text{выкл}}$ ) транзистора. Крутизна фронтов включения и выключения может быть уменьшена при прочих равных условиях за счет коэффициента усиления, например, посредством

включения в схему промежуточных усилителей. При этом одновременно будет решаться задача уменьшения мощности сигнала управления.

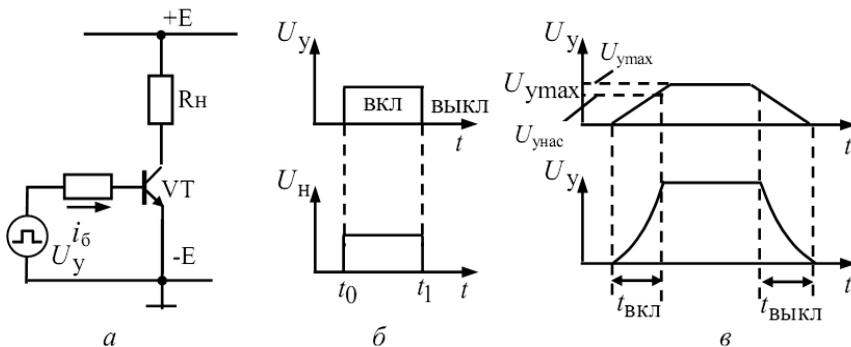


Рис. 3.1. Простейшее транзисторное реле:

а – принципиальная схема; б – идеальные диаграммы напряжения; в – диаграммы напряжения с учетом времени коммутации

Хорошая управляемость и высокое быстродействие транзисторных ключей позволяют расширить функции коммутационных аппаратов. Основными направлениями этого являются:

- регулирование тока или напряжения в коммутируемой цепи;
- контроль параметров и защита коммутируемой цепи;
- функционирование по заданному алгоритму;
- контроль, защита и диагностика основных функциональных узлов.

Регулирование тока или напряжения осуществляется переводом транзистора в активный или импульсный режим с управляемым коэффициентом заполнения импульсов. В некоторых электронных аппаратах импульсное регулирование осуществляется в целях плавного нарастания тока в нагрузке при ее подключении к источнику питания. Например, плавное нарастание тока в галогеновых лампах повышает ресурс их работы. Импульсное регулирование также используется для обеспечения плавного пуска или остановки электропривода постоянного тока.

Примером схем, реализующих работу реле по заданному алгоритму, может служить электронное реле времени.

### 3.3. Программа работы

1. Изучить электрическую схему и принцип работы электронного реле времени.
2. Собрать модель схемы электронного реле времени (см. рис. 3.2) в редакторе программы Micro-Cap, используя методику лабораторной работы № 1.
4. Построить диаграммы тока и напряжения, поясняющие принцип работы исследуемой схемы.
5. Обеспечить значения выдержки времени реле, заданные преподавателем.
6. Выполнить анализ полученных в ходе выполнения работы результатов.
7. Оформить отчет.

### 3.4. Описание схемы электронного реле времени

Модель схемы изучаемого электронного реле времени представлена на рис. 3.2. Данный электронный аппарат отключает нагрузку R1 через несколько минут после размыкания выключателя SB1.

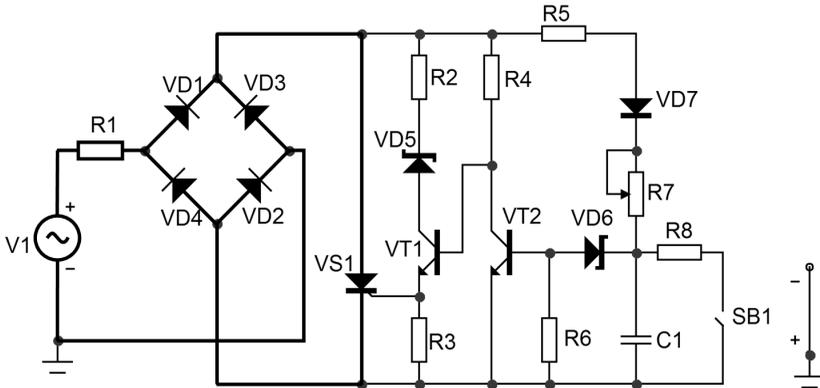


Рис. 3.2. Модель схемы транзисторного реле времени

В исходном состоянии SB1 замкнут, конденсатор C1 разряжен, транзистор VT2, шунтирующий эмиттерный переход транзистора VT1, находится в непроводящем состоянии. При этом через резистор R4 на базу транзистора VT1 подается управляющий сигнал. VT1 открыт и на управ-

ляющий электрод тиристора VS1 через резистор R2, стабилитрон VD5 и транзистор VT1 поступают импульсы тока, которые открывают тиристор в начале каждой полуволны выпрямленного сетевого напряжения.

После размыкания выключателя SB1 через резистор R5, диод VD7 и потенциометр R7 начинается зарядка конденсатора C1. Когда значение напряжения на этом конденсаторе достигнет величины напряжения стабилизации VD6, стабилитрон VD6 открывается. Далее относительно плавно открывается транзистор VT2, а VT1 и VS1 закрываются, нагрузка R1 перестает получать питание.

В дежурном режиме реле потребляет от сети 220 В мощность не более 0,5 Вт. Максимальная мощность подключаемой нагрузки ограничена типами примененного диодного моста VD1 и тиристора VS1. Желаемое значение времени выдержки устанавливают потенциометром R7.

### 3.5. Порядок выполнения работы

1. Включить ПК и запустить программу (Micro-Cap).
2. Собрать модель схемы электронного реле времени (см. рис. 3.3). Параметры для настройки элементов приведены в табл. 3.1. Элементную базу выбирать из библиотеки «**Analog Primitives**» в соответствии с табл. 3.2.

Таблица 3.1

Параметры элементов схемы

Элемент	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	C1	SB1
Значения	250	1k	680	200k	500	2Meg	2k	75	400u	T,0,0.4

Таблица 3.2

Выбор элементной базы

Элемент схемы	R7	VD1-VD4	VD5	VD6	VS1	VD7	VT1	VT2	V1
Название модели	<i>Pot</i>	<i>Diode</i>	<i>Zener</i>	<b>Zener</b>	<b>SCR</b>	<i>Diode</i>	<i>NPN</i>	<i>NPN</i>	<i>Sine Source</i>
Имя набора атрибутов	-	\$GENERIC	1N3023A	<b>см. пункты 3 и 4</b>	1N3031A	ZTX457	BC447	60HZ	

*V1 (Sine Source) настроить со следующими параметрами: A=220; F=50; RS=1m*

3. Настроить параметр  $V_{DRM}$  (пиковое значение повторяющегося прямого блокируемого напряжения – максимально допустимое значение прямого напряжения, которое может быть приложено к тиристор, не вызывая его отпирания) для VS1 в соответствии со значением напряжения, приложенного между его анодом и катодом.

4. Выбрать модель стабилитрона VD6 по величине напряжения и тока стабилизации – напряжение стабилизации (BV) выбирается в соответствии с напряжением заряда конденсатора C1, ток стабилизации  $I_{BV}$  выбирается в соответствии с необходимой величиной тока отпирания транзистора VT2 (определяется контактной разностью потенциалов перехода база-эмиттер  $V_{JE}$ , которую требуется преодолеть, и объемным сопротивлением база-эмиттер  $R_B+R_E$ ).

5. Получить временные диаграммы токов и напряжений, поясняющие принцип работы электронного реле времени (рис. 3.3). Минимальный набор диаграмм:

- а) ток нагрузки R1;
- б) напряжение на конденсаторе C1;
- в) ток через тиристор VS1;
- г) ток через стабилитрон VD6;
- д) ток эмиттера транзистора VT1.

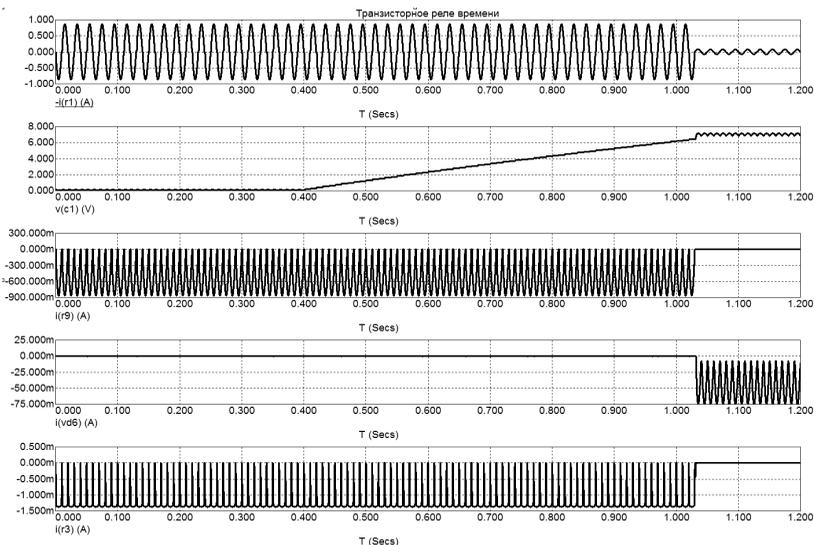


Рис. 3.3. Временные диаграммы работы электронного реле времени

6. Обеспечить величину выдержки времени на отключение, заданную преподавателем. Для обеспечения необходимой величины выдержки времени реле необходимо подобрать параметры RC-цепи (конденсатор которой в исходном состоянии шунтирован контактами ключа управления).

7. Выполнить анализ результатов исследования, сформулировать выводы по работе и оформить отчет.

### **Контрольные вопросы**

1. Назначение и функции электронного реле времени.
2. Объяснить принцип работы схемы электронного реле времени.
3. Какие параметры коммутируемой цепи определяют величину выдержки времени реле?
4. Объяснить способ перевода SCR-тиристора в непроводящее состояние, используемый в рассмотренной схеме.
5. Чем обусловлены наличие и величина тока после выключения рассмотренной схемы реле времени?
6. Параметры выбора стабилитронов на примере рассмотренной схемы электронного реле времени.
7. Достоинства и недостатки электронных реле и контакторов.
8. Функции управляемых электронных коммутационных аппаратов. Усилительные и ключевые режимы работы электронных аппаратов.
9. Схема и диаграммы при импульсном ограничении и регулировании тока.
10. Какие показатели определяют рациональные области и эффективность использования электронных аппаратов?

## РАБОТА № 4

# ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ БЕСКОНТАКТНЫХ КОНТАКТОРОВ

### 4.1. Цель работы

Ознакомиться с устройством и принципом работы бесконтактного регулятора напряжения и бесконтактного твердотельного реле.

### 4.2. Программа работы

1. Изучить функциональные возможности и работу регулятора напряжения и твердотельного реле.
2. Исследовать работу блока управления симисторами и тиристорами (БУСТ) в режиме бесконтактного контактора.
3. Исследовать работу БУСТ в режиме регулирования мощности двумя методами: фазовое управление; управление по числу полупериодов.
4. Исследовать работу твердотельного реле CRYDOM.
5. Сформулировать выводы по проделанной работе.
6. Оформить отчет.

### 4.3. Основные теоретические сведения

*Регулятор напряжения* поддерживает выходное напряжение в заданных пределах во всех режимах работы при изменении входного напряжения, величины нагрузки, температуры окружающей среды и т. д. Кроме того, он может выполнять дополнительные функции – защищать элементы установки от аварийных режимов и перегрузок, автоматически подключать к сети силовую часть установки. Блок-схема регулятора напряжения представлена на рис. 4.1.

Регулятор содержит измерительный элемент, элемент сравнения и регулирующий элемент. Измерительный элемент воспринимает напряжение  $U_d$  и преобразует его в сигнал  $U_{изм}$ , который в элементе сравнения сравнивается с эталонным значением  $U_{эт}$ . Если величина  $U_{изм}$  отличается от эталонной величины  $U_{эт}$ , то на выходе измерительного элемента появляется сигнал  $U_0$ , который активизирует регулирующий элемент, компенсирующий отклонения напряжения от заданных пределов.

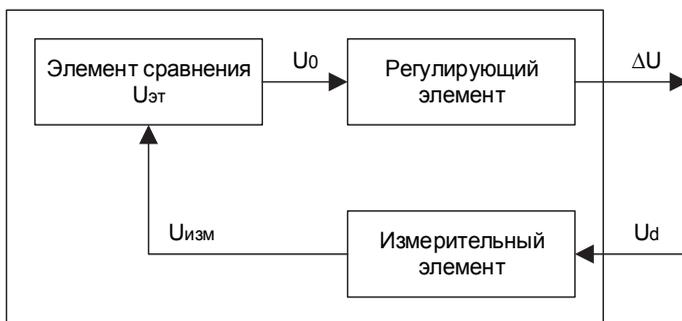


Рис. 4.1. Блок-схема регулятора напряжения

Чувствительным элементом электронных регуляторов напряжения, как правило, является входной делитель напряжения, с которого напряжение подается на элемент сравнения, где роль эталонной величины обычно играет напряжение стабилизации стабилитрона. Стабилитрон не пропускает через себя ток при напряжении ниже напряжения стабилизации и пробивается, т.е. начинает пропускать через себя ток, если значение напряжения на нем превысит величину напряжения стабилизации. Напряжение же на стабилитроне остается при этом почти неизменным.

Блок управления симисторами и тиристорами (БУСТ) обеспечивает управление симисторами и тиристорами, работающими с активной нагрузкой (нагревательными элементами печей, инфракрасными лампами и др.), а также для регулирования мощности совместно с пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) регуляторами.

**Твердотельное реле** – электронное устройство, которое служит для коммутации электрических цепей и обеспечивает электрическую изоляцию между цепями контроля (обычно низковольтные) и силовыми цепями (обычно высоковольтные). Во всех твердотельных реле коммутация цепей нагрузки осуществляется бесконтактно за счет управления встроенными полупроводниковыми элементами. Благодаря технологическому развитию полупроводниковой технологии появилось целое поколение твердотельных реле, обладающих неоспоримыми преимуществами в сравнении с электромеханическими:

- высокая энергоэффективность (потребление на 95 % ниже, чем у электромагнитных);
- высокая надежность;
- совместимость с логическими микросхемами;
- безындуктивный вход;

- отсутствие «дребезга» контактов, искр и дуговых разрядов;
- отсутствие акустического шума;
- отсутствие электромагнитных помех в момент переключения;
- высокая стойкость к ударам и вибрации;
- хорошая изоляция между входом и выходом;
- высокое быстродействие;
- маломощный управляющий сигнал;
- широкий диапазон рабочих температур ( $-30\dots+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- низкие массогабаритные показатели.

Элементная структура твердотельных реле различных производителей относительно неизменна. Исходным входным элементом является светодиод входной оптопары, далее следует оптическая развязка, фотогальваническая коммутация, переключающая цепь, выходной ключ с защитой (рис. 4.2).

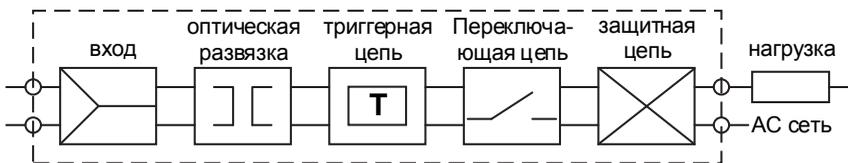


Рис. 4.2. Структура твердотельного реле

Управляющая цепь содержит светодиод, преобразующий протекающий через него ток в инфракрасное излучение, которое, проходя в корпусе некоторое расстояние, попадает на матрицу фотогальванических ячеек, затем преобразует падающий на нее свет в напряжение, которое, в свою очередь, управляет элементом, замыкающим выходной ключ (рис. 4.3).

Если ток в начале цепи не протекает, формирование напряжения отсутствует и выходной ключ размыкает цепь коммутации.

Твердотельные реле подразделяются на две группы: постоянного и переменного тока. Аппараты постоянного тока выполняются на базе полевых транзисторов (MOSFET) или биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), а переменного тока – на базе тиристоров или симисторов. При этом реле постоянного тока могут быть одно- или двухполярными (последние могут использоваться и для переключения переменного тока), а реле переменного тока делятся на полностью и частично управляемые, силовой элемент первых может вклю-

чаться в произвольный момент времени. У частично управляемых твердотельных реле силовой элемент можно выключить только при нулевом значении протекающего через него тока. Включение твердотельного реле в момент нулевой фазы уменьшает помехи при коммутации, поэтому в тех случаях, когда допустимо использование таких реле, предпочтение отдают именно им.

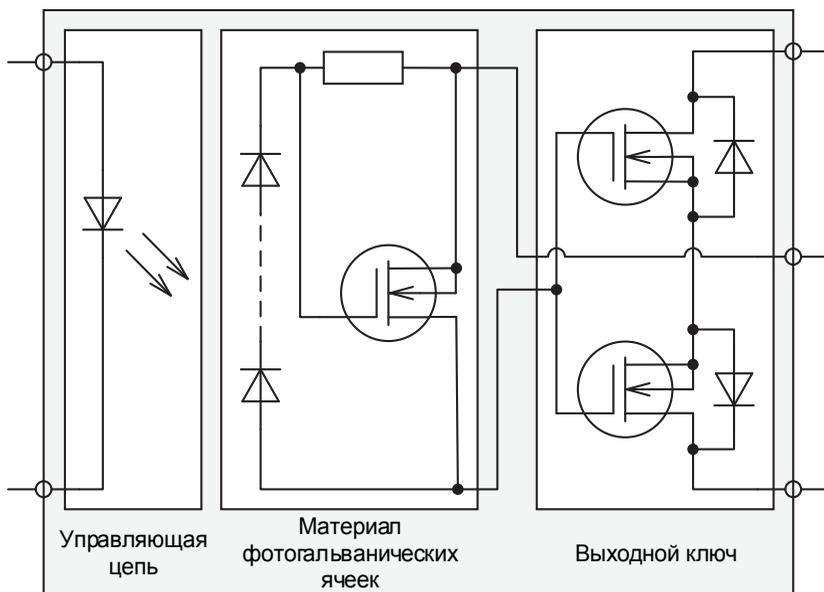


Рис. 4.3. Упрощенное представление устройства твердотельного реле

Благодаря оптической развязке между входной управляющей цепью и выходным каскадом достигается полная гальваническая развязка по напряжению между входом и выходом.

Твердотельные реле заменяют электромеханические в измерительной и исследовательской аппаратуре, программируемых логических контроллерах и промышленной автоматике, телекоммуникационной аппаратуре и пр.

#### 4.4. Порядок выполнения работы

Схема лабораторной установки представлена на рис. 4.4.

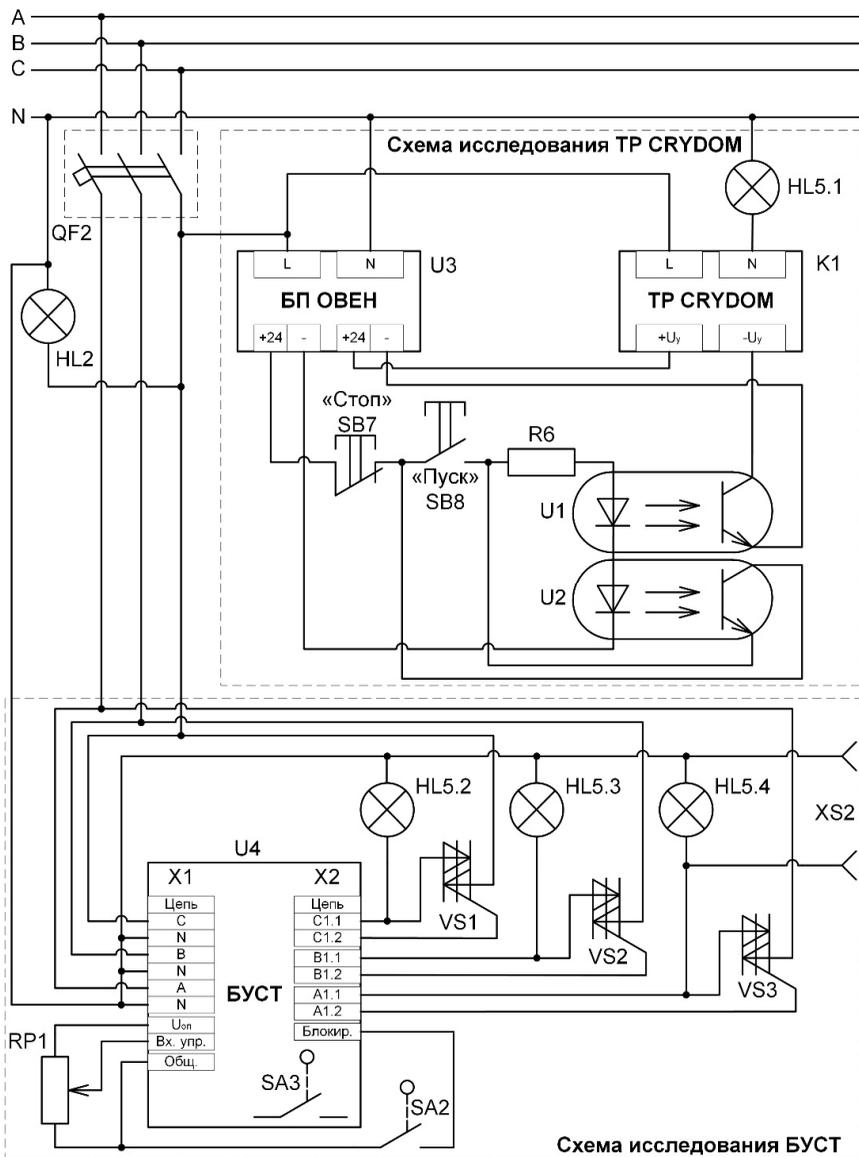


Рис. 4.4. Схема лабораторной установки

### **Работа БУСТ в режиме бесконтактного контактора**

1. Установить задающий потенциометр RP1 в крайнее правое положение, переключатель SA2 – в выключенном состоянии. Переключатель SA3 на корпусе БУСТ находится во включенном состоянии.

***Переключать тумблер SA3 только при отключенном автомате QF2!***

2. Включить автоматический выключатель QF2, при этом нагрузочные лампы HL5.2, HL5.3, HL5.4 не горят, поскольку силовые симисторы VS1, VS2, VS3 не включены, так как управляющие импульсы заблокированы разомкнутым переключателем SA2.

3. Замкнуть SA2 – блокировка импульсов управления симисторами снимается, симисторы включаются полностью (RP1 в крайнем правом положении) и лампы HL5.2, HL5.3, HL5.4 горят полным накалом.

4. Разомкнуть переключатель SA2, это приведет к отключению нагрузки, лампы HL5.2, HL5.3, HL5.4 гаснут.

**Работа БУСТ в режиме регулирования мощности** может происходить в режиме управления фазовым методом или по числу периодов питающего напряжения. ***Для работы в режиме управления фазовым методом выполнить следующее.***

5. Разомкнуть переключатель SA3, находящийся на крышке прибора; установить задающий потенциометр RP1 в крайнее левое положение; установить переключатель SA2 в выключенное состояние.

6. При подаче питания автоматическим выключателем QF2 и замыкании переключателя SA2 мощность, выдаваемая на нагрузку, определяется положением задающего потенциометра RP1.

7. При изменении положения движка потенциометра наблюдать изменение мощности на нагрузке по интенсивности свечения нагрузочных ламп HL5.2, HL5.3, HL5.4.

8. Подключить осциллограф С1-65 к предусмотренным для этого разъемам XS2 (в районе нагрузочной лампы HL5.4).

9. С помощью осциллографа контролировать форму тока и напряжения на нагрузке при различных положениях потенциометра RP1.

10. Зарисовать полученные осциллограммы.

***Для работы в режиме управления по числу периодов питающего напряжения выполнить следующее.***

11. Включить переключатель SA3, находящийся на крышке прибора; установить задающий потенциометр RP1 в крайнее левое положение; установить переключатель SA2 в выключенное состояние.

12. При подаче питания и замыкании переключателя SA2 напряжение на нагрузку подается релейным способом (включено-выключено).

Этот способ применим для инерционных (как правило, тепловых) объектов.

13. При исследовании работы БУСТ в этом режиме следует действовать аналогично вышеописанному.

### **Исследование работы твердотельного реле CRYDOM**

14. Собрать схему управления бесконтактным пускателем (твердотельным реле), включающим в себя выходные цепи блока питания БП12Б-Д2 U3, выходную оптоэлектронную пару U2, внешние управляющие элементы – кнопочные выключатели с самовозвратом SB7 «Стоп» и SB8 «Пуск».

15. Включить автоматический выключатель QF2, при этом на блок питания U3 и твердотельное реле K1 подается однофазное питание 220 В. Блок питания U3 выдает на выходе напряжение 24 В, которое питает цепи управления твердотельного реле. Лампа HL5.1 не горит.

16. Нажать SB8 «Пуск», при этом на входные цепи управления оптоэлектронной пары U1 через токоограничивающий резистор R6 подается напряжение. Оптоэлектронная пара U1, включившись, замыкает силовой ключ твердотельного реле K1, цепь питания лампы HL5.1 замыкается, и лампа загорается. Вторая оптоэлектронная пара U2 шунтирует кнопочный выключатель SB8 «Пуск», что позволяет его отпустить.

17. Нажать выключатель SB7 «Стоп». Для отключения нагрузки – лампа HL5.1.

## **Контрольные вопросы**

1. Какое устройство называется электронным аппаратом?
2. Достоинства и недостатки электронных аппаратов.
3. Назначение и принцип работы регулятора напряжения.
4. Принцип работы БУСТ в режиме бесконтактного контактора.
5. Принцип работы БУСТ при регулировании фазовым методом.
6. Принцип работы БУСТ в режиме регулирования мощности при управлении по числу периодов питающего напряжения.
7. Твердотельное реле: назначение, достоинства и недостатки.
8. Принцип работы твердотельного реле CRYDOM.
9. Отличительные особенности твердотельного реле постоянного и переменного тока.
10. Назначение и реализация гальванической развязки цепей управления с силовой частью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2.105–95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – Введ. с 30.06.1996. – М.: Стардартинформ, 2007. – 32 с.
2. ГОСТ 7.1–2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Введ. с 30.06.2004. – М.: Стардартинформ, 2010. – 49 с.
3. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 1. Электромеханические аппараты: учебник для вузов / Е.Г. Акимов и др.; под ред. А.Г. Годжелло, Ю.К. Розанова. – М.: Академия, 2010. – 352 с.
4. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 2. Силовые электронные аппараты: учебник для вузов / А.П. Бурман и др.; под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Академия, 2010. – 320 с.
5. Электрические и электронные аппараты: учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. П.А. Курбатова. – М.: Юрайт, 2016. – 440 с.
6. Программа схмотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10: учеб. пособие для вузов / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск: НИУ МЭИ, 2012. – 617 с.
7. Практикум по схмотехническому моделированию линейных электрических цепей с помощью Micro-Cap 7: учеб. пособие / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, Ф.Э. Лаппи, В.А. Аксютин; под общей ред. В.Ю. Неймана. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 104 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра \_\_\_\_\_ электротехнических комплексов

## ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1

«Изучение полупроводниковых электронных ключей»

Дисциплина «Электрические и электронные аппараты»

**Состав бригады:**

Иванов И.И.

Сидоров С.С.

**Дата, подпись:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Баллы:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Преподаватель:**

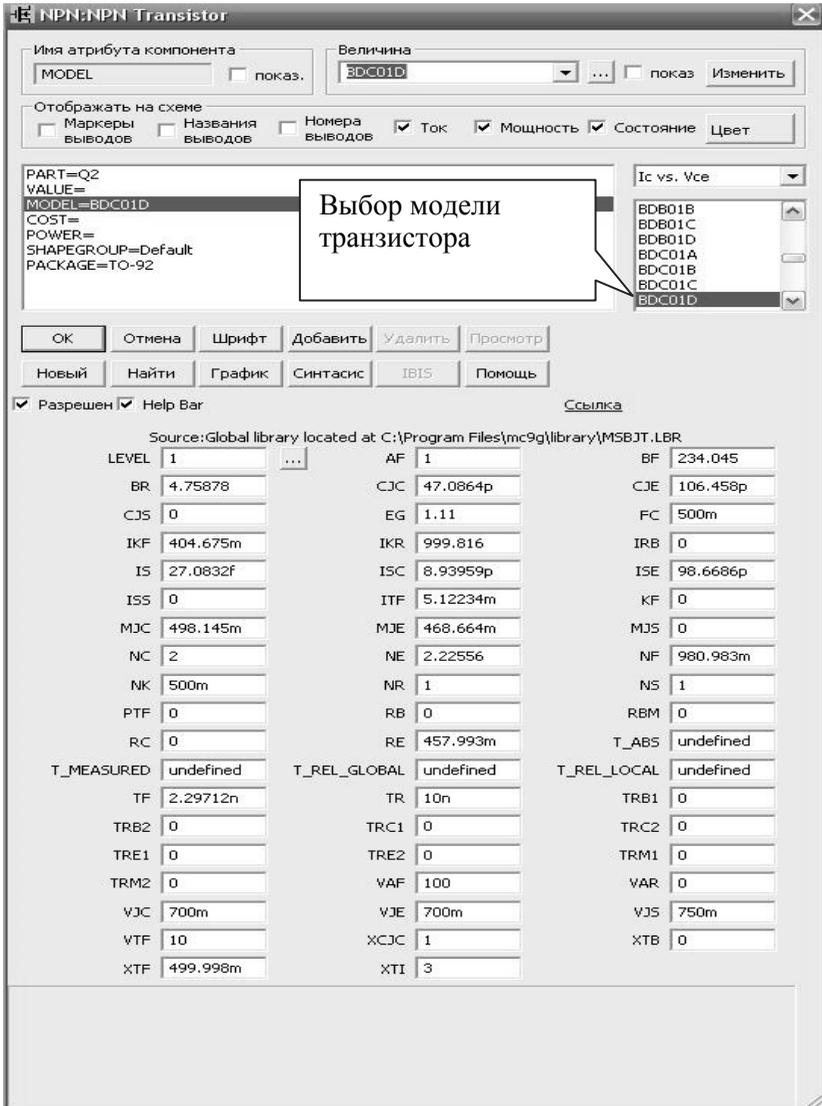
к.т.н., доц. Нейман Л.А.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Новосибирск, 201 \_\_ г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Окно выбора атрибутов транзистора

## Некоторые параметры транзисторов

Обозначение	Параметр	Единица измерения
IS	Ток насыщения при температуре 27 °С	А
BF	Максимальный коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ (без учета токов утечки)	
BR	Максимальный коэффициент усиления тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ	
NF	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для нормального режима	
NR	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для инверсного режима	
ISE*	Ток насыщения утечки перехода база-эмиттер	А
ISC*	Ток насыщения утечки перехода база-коллектор	А
ISS	Ток насыщения <i>p-n</i> -перехода подложки	А
NS	Коэффициент эмиссии тока <i>p-n</i> -перехода подложки	
NE*	Коэффициент эмиссии тока утечки эмиттерного перехода	
NC*	Коэффициент эмиссии тока утечки коллекторного перехода	
RC	Объемное сопротивление коллектора	Ом
RE	Объемное сопротивление эмиттера	Ом
RB	Объемное сопротивление базы (максимальное) при нулевом смещении перехода база-эмиттер	Ом
RBM*	Минимальное сопротивление базы при больших токах	Ом
IRB*	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50 % полного перепада между RB и RBM	А
TF	Время переноса заряда через базу в нормальном режиме	с
TR	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме	с
ITF	Ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора при больших токах	А

## Окончание таблицы

Обозначение	Параметр	Единица измерения
CJE	Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	пФ
VJE (PE)	Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	В
MJE (ME)	Коэффициент, учитывающий плавность эмиттерного перехода	
CJC	Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	Ф
VJC (PC)	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	В
MJC (MC)	Коэффициент, учитывающий плавность коллекторного перехода	
CJS (CCS)	Емкость перехода коллектор-подложка при нулевом смещении	Ф
VJS (PS)	Контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка	В
MJS (MS)	Коэффициент, учитывающий плавность перехода коллектор-подложка	
XCJC	Коэффициент расщепления барьерной емкости база-коллектор по отношению к внутренней базе	~
FC	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов	
EG	Ширина запрещенной зоны	эВ
XTB	Температурный коэффициент BF и BR	–

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ .....	4
1. Предварительная подготовка .....	4
2. Допуск к работе.....	4
3. Общие требования по технике безопасности .....	4
ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА.....	6
1. Общие положения .....	6
2. Требования к содержанию структурных элементов отчета.....	6
Работа № 1. Изучение полупроводниковых электронных ключей .....	7
1.1. Цель работы.....	7
1.2. Основные теоретические сведения.....	7
1.3. Программа работы .....	10
1.4. Порядок выполнения работы .....	10
Контрольные вопросы .....	21
Работа № 2. Изучение принципа работы электронного коммутационного аппарата.....	22
2.1. Цель работы.....	22
2.2. Основные теоретические сведения.....	22
2.3. Программа работы .....	24
2.4. Описание схемы тиристорного таймера.....	24
2.5. Порядок выполнения работы .....	26
Контрольные вопросы .....	28
Работа № 3. Изучение принципа работы электронного реле времени.....	29
3.1. Цель работы.....	29
3.2. Основные теоретические сведения.....	29
3.3. Программа работы .....	31
3.4. Описание схемы электронного реле времени.....	31
3.5. Порядок выполнения работы .....	32
Контрольные вопросы .....	34
Работа № 4. Изучение принципа работы бесконтактных контакторов.....	35
4.1. Цель работы.....	35
4.2. Программа работы .....	35
4.3. Основные теоретические сведения.....	35
4.4. Порядок выполнения работы .....	38
Контрольные вопросы .....	41
Библиографический список.....	42
Приложение А .....	43
Приложение Б.....	44

**Абрамов Евгений Юрьевич  
Нейман Людмила Андреевна**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ**

**Учебно-методическое пособие**

Редактор *Л.Н. Ветчакова*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*  
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 03.05.2017. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.  
Уч.-изд. л. 2,79. Печ. л. 3,0. Изд. № 8. Заказ № 652. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20