

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии»

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ОСВЕЩЕНИЕМ

Практикум

для студентов специальности

1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области приборостроения, учебно-методическим объединением
по образованию в области обеспечения качества*

Минск
БНТУ
2020

УДК 621.32.07 (076.5)
ББК 31.294я7
С40

С о с т а в и т е л и :

*К. В. Пантелеев, А. В. Самарина,
А. Л. Жарин, О. К. Гусев*

Р е ц е н з е н т ы :

В. Б. Оджаев, А. П. Крень

Системы регулирования и управления освещением : практикум
С40 для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазер-
ные приборы и системы» / К. В. Пантелеев, А. В. Самарина, А. Л. Жа-
рин, О. К. Гусев. – Минск : БНТУ, 2020. – 87 с.
ISBN 978-985-583-278-3.

В практикуме содержатся общие характеристики систем регулирования и управления источниками электрического освещения. Подробно описаны структура и организация силовой части энергоэффективных приборов для освещения. Изложены указания по выполнению лабораторных работ, включающие практические задания по расчету и моделированию электрических схем различного типа источников питания и электронных драйверов управления осветительными приборами. Каждая лабораторная работа содержит краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы и примеры решения заданий.

УДК 621.32.07 (076.5)
ББК 31.294я7

ISBN 978-985-583-278-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Представленные в практикуме лабораторные работы предлагаются студентам, обучающимся по специальности 1-38 01 02 «Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы» для получения базовых и расширенных знаний по расчету и моделированию электрических схем различного типа источников питания и электронных драйверов управления осветительными приборами.

Каждая лабораторная работа содержит цель, основные теоретические сведения о предмете работы, порядок проведения работы, контрольные вопросы и задания, список рекомендуемой литературы по теме работы. Порядок выполнения лабораторной работы представлен этапами. Лабораторная работа считается выполненной при условии проведения каждого этапа и предоставления отчета. Отчет должен включать следующее:

1. Номер, название и цель работы.
2. Используемое оборудование и средства.
3. Практическую часть (порядок выполнения работы) и пронумерованные развернутые ответы на контрольные вопросы.

Требования к практической части:

– задания практической части должны быть оформлены в виде пронумерованных пунктов, названия которых отражают их содержание;

– все схемы, таблицы, графики должны иметь названия и выполняться только карандашом и линейкой;

– после схемы необходимо приводить номиналы компонентов;

– все действия внутри пунктов должны сопровождаться краткими письменными пояснениями;

– в конце каждого пункта необходимо приводить письменные выводы, сделанные по результатам выполнения задания.

4. Вывод по итогам выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MULTISIM

Цель работы. Знакомство с программной средой схемотехнического моделирования MULTISIM, составом библиотек компонентов и их характеристиками, процессом подготовки схем.

Используемое оборудование и средства. Персональный компьютер, программное обеспечение MULTISIM.

Методические указания. Лабораторная работа выполняется студентами за два часа аудиторных занятий.

1.1. Краткие теоретические сведения

Программная среда схемотехнического моделирования MULTISIM, ранее известная как Electronics Workbench, является удобным программным средством для изучения и моделирования работы различных аналоговых и цифровых электронных схем. По возможностям моделирования MULTISIM не уступает более серьезным, но и более сложным в освоении и использовании программным пакетам.

1.1.1. Основные элементы программной среды MULTISIM. Программная среда MULTISIM имеет простой и ясный пользовательский интерфейс, выполненный в традиционном для MS Windows виде, который состоит из:

- строки заголовка, расположенной в верхней части экрана;
- строки главного меню;
- командных строк инструментальной линейки (управляющих кнопок-пиктограмм), библиотек электронных элементов, узлов и приборов.

Пользовательский интерфейс MULTISIM можно изменить, выбрав в команде меню **Options** (Опции) пункт **Customize User Interface** (Настроить пользовательский интерфейс). С помощью диалогового окна **Customize** (Настройка) можно настроить систему меню и назначить горячие клавиши клавиатуры любой его команде, изменить или создать новые панели инструментов и закрепить их в любом месте.

С помощью опции **Options/Sheet Properties** (Настройка свойств листа) и ее закладок **Circuit** (Схема), **Workspace** (Рабочая область), **Wiring** (Соединение), **PCB** (Печатная плата) и **Visibility** (Доступность) можно изменить свойства каждого схемного документа (листа): размер и цвет схемы, шрифт текста описания схемы, настройки печатной платы, отображение или сокрытие слоев комментариев и другие параметры листа.

Глобальные настройки управления свойствами среды MULTISIM выполняются с помощью опции **Global Preferences** (Глобальные настройки) той же команды **Options** со следующими закладками:

- **Paths** (Путь), в диалоговом окне которой можно указать путь к файлам баз данных и осуществить другие настройки;
- **Save** (Сохранить), в окне которой можно задать период автоматического сохранения и выполнить другие настройки;
- **Parts** (Компоненты), в диалоговом окне которой можно выбрать режим размещения компонентов и стандарт символов (ANSI или DIN).

Внимание! Для вывода на экран графических изображений компонентов электронных схем, наиболее приближенных к их условным графическим обозначениям, установленным ГОСТ, необходимо щелкнуть мышью на кружке стандарта DIN и кнопке ОК (рис. 1.1).

В этом же окне можно выбрать режим моделирования (**Digital Simulation Settings**): идеальная или реальная (более точная) цифровая эмуляция;

- **General** (Общее), в окне которой можно изменить конфигурацию компонентов, колеса мыши и инструментов соединения компонентов.

Кроме команды **Options**, *строка главного меню* содержит несколько команд (рис. 1.2), в каждой из которых больше десятка опций со своими закладками и кнопками. Для команд характерны как общеизвестные опции, такие как **Open**, **Save**, **Copy**, **Paste** и другие, так и опции, типичные лишь для среды MULTISIM. Подробное описание команд, опций и моделей компонентов схем дано в меню **Help** (Помощь).

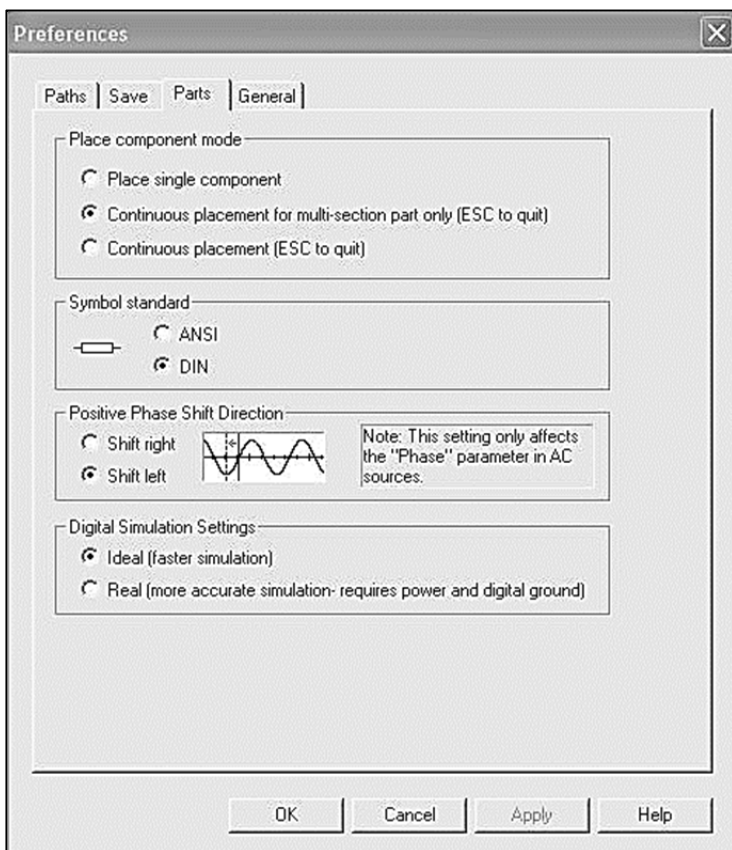


Рис. 1.1. Выбор режима размещения компонентов и стандарта символов (ANSI или DIN)

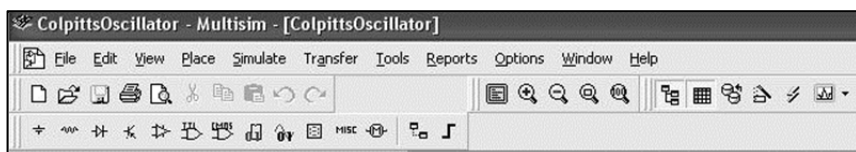


Рис. 1.2. Строка главного меню

Отметим назначение отдельных меню и их опций, наиболее часто используемых при проектировании электронных схем.

- Опции меню **File** предназначены для открытия, закрытия, сохранения и печати смоделированных электронных схем.
- Опции меню **Edit** (Редактирование) можно использовать для изменения объектов схем на лицевой панели или в блоке программы.
- Опции команды **View** предназначены для вывода по краям рабочего поля размерных полос и точечной сетки на рабочем поле (**Show Border, Show Page Bounds, Show Grid**), пиктограмм библиотек в инструментальной линейке (**Toolbar** (рис. 1.3), первый и второй столбцы) и других пиктограмм и панелей. Так, при щелчке мышью на опции **Virtual** в инструментальной линейке библиотек добавляется панель *виртуальных* приборов.

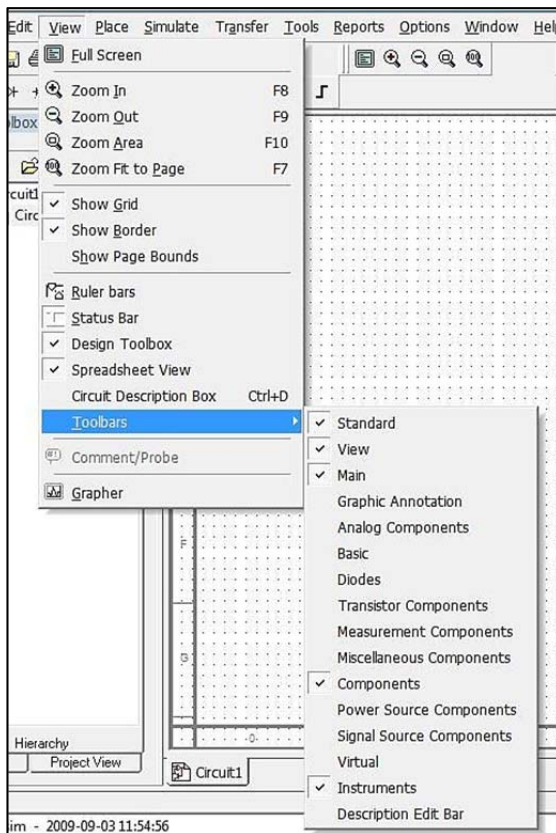


Рис. 1.3. Инструментальная линейка Toolbar

В меню **Place** после щелчка мышью на опции **AText** можно внести (с помощью кнопок клавиатуры) на рабочее поле программы текстовую информацию, в том числе на русском языке. К сожалению, кириллический шрифт не поддерживается программой MULTISIM, и при сохранении (**Save**) схем русские буквы заменяются соответствующими символами расширенного двоично-десятичного кода EBCDIC.

В меню **Transfer** (Обмен данными) размещены опции, позволяющие экспортировать разработанные схемы устройств в другие приложения, в частности, в программу объемного изображения **Ultiboard** среды MULTISIM.

Посредством опций команды **Tools** (Инструменты) можно конвертировать схемы, спроектированные в ранних версиях программы, в текущую MULTISIM, выводить на экран из библиотеки MULTISIM (**Tools/Circuit Wizard**) средства разработки усилителей, фильтров, устройств на базе таймера 555 и выводить готовые схемы на операционном усилителе.

Опция **Analyses** в команде **Simulate** (Эмуляция) предназначена для выбора методов анализа и установки параметров моделирования (см. рис. 1.4, третий и четвертый столбцы). Перед запуском эмуляции схемы необходимо убедиться, что в схеме есть источник энергии и заземление.

В среду MULTISIM включено множество средств анализа данных эмуляции (см. список всех функций анализа в четвертом столбце на рис. 1.4), выбор и настройки параметров которых будут описаны при разработке схем. Результаты анализа отображаются на графиках программ **Postprocessor** и **Grapher**.

Настройки эмуляции можно изменить с помощью диалоговых окон опции **Simulate/Interactive Simulation Settings** (Эмуляция/Настройки интерактивной эмуляции). Некоторые из настроек интерактивной эмуляции:

- по умолчанию установлено время окончания эмуляции через $1e+30$ с;

- шаг по времени генерируется автоматически.

Если возникли ошибки при эмуляции, нужно запустить Советника эмуляции (**Simulation Error Log/Audit Trail**) (рис. 1.4). Типичными ошибками являются слишком малое время шага эмуляции (**Time step error**) и ошибки в сингулярной матрице (**Singular matrix**).

Для исправления ошибок нужно увеличить максимальный шаг по времени **TMAX**, например, с $TMAX = 1 \cdot 10^{-5}$ на $TMAX = 1 \cdot 10^{-3}$, увеличить относительный допуск ошибки (**Relative error tolerance**), изменить начальные условия и другие настройки, а при ошибке **Singular matrix** нужно уменьшить порог диагонального элемента (**PIVTOL**) и увеличить допустимый уровень заполнения (**PIVREL**), равный по умолчанию $1 \cdot 10^{-13}$.

В среду MULTISIM встроен эмулятор тысяч моделей компонентов **SPICE** и эмулятор **XCSPICE**, предназначенные для эффективного эмулирования цифровых компонентов, а также конструктор моделей (**Model Makers**), который автоматически генерирует модель на основании данных **Databook**.

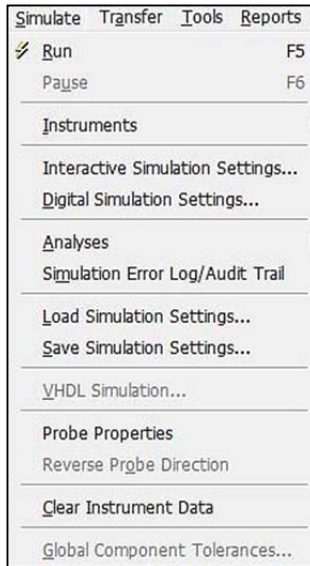
Конструктор моделей запускается при редактировании компонентов из базы данных на закладке окна свойств компонента (**Model/Component Properties/(Add/Edit)/Start Model Maker**). Начальные настройки моделей не фиксированы, они соответствуют определенной модели. С помощью данных **Databook** можно выбрать другие численные значения.

В среде MULTISIM имеется три базы данных (**Tools/Database/Database Manager** – Инструменты/База данных/Проводник баз данных):

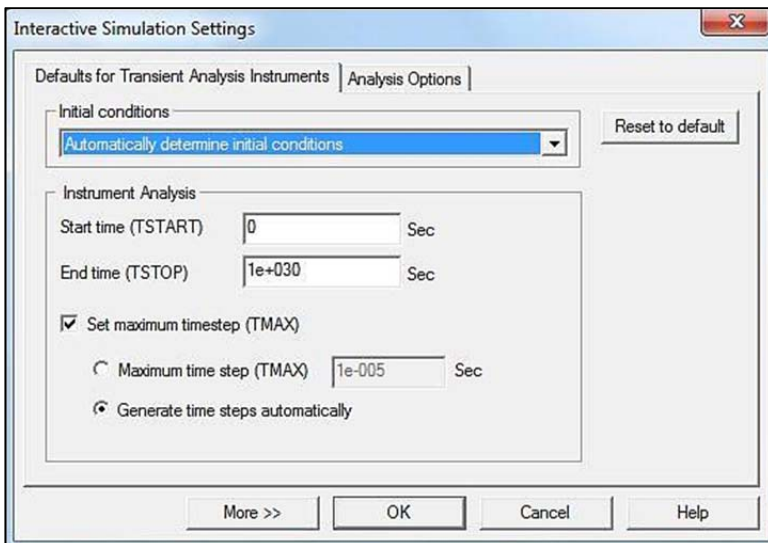
- **Master Database** (Главная база данных), содержащая компоненты, из которых можно *только* считывать информацию;
- **User Database** (Пользовательская база данных), предназначенная для хранения компонентов на персональном компьютере;
- **Corporate Database** (Корпоративная база данных), компоненты которой доступны только пользователям корпоративной сети.

Все базы данных разделяются на группы, а они, в свою очередь, на семейства. Когда пользователь выбирает компонент и размещает его на рабочее поле, создается новая копия. Все изменения в ней не затрагивают информацию, хранящуюся в базе данных. Параметры компонентов можно изменить и в базе данных, в любое время восстановить их в том виде, в котором они были записаны изначально, или добавить в нее свой разработанный компонент.

Опции команды **Windows** используются для быстрого размещения на рабочем поле открытых окон участков схем и спроектированных приборов.



a



б

Рис. 1.4. Запуск (а) и диалоговое окно (б) Советника эмуляции

В команду **Reports** включены опции формирования таблиц с подробной информацией об элементах и приборах, включенных в следующую схему электронного устройства.

Среда MULTISIM содержит функции и режимы работы для целей обучения. Эти функции включают назначение *дефектов* компонентов схемы, установку глобальных ограничений, распространяемых на все проекты, и локальных – для конкретной схемы и для вывода конкретного элемента. Назначить дефект определенному выводу установленного компонента можно на закладке **Fault** (Дефект) в диалоговом окне свойств этого элемента: **None** (Нет дефекта), **Open** (Обрыв), **Short** (Короткое замыкание), **Leakage** (Утечка).

1.1.2. Командные строки инструментальной линейки. Число выводимых на экран панелей библиотек с соответствующим набором пиктограмм компонентов в *инструментальной линейке* (см. рис. 1.5) зависит от их выбора пользователем в диалоговом окне (см. рис. 1.5, второй столбец), открываемом после щелчка мышью на кнопке View, наведения указателя мыши на опцию Toolbars и выбора панели Components.

Строки инструментальной линейки содержат управляющие кнопки, часть из которых используется для запуска/выключения программы (кнопка **Run Simulation**) или ее остановки (кнопка **Pause**), а другая часть (кнопки библиотек инструментов и приборов, масштабирования и др.) – при проектировании схем.

Надо отметить, что в MULTISIM имеется несколько типов библиотек компонентов:

- **Family Components** – библиотеки с номинальными значениями параметров компонентов фирм-производителей;
- **Virtual Components** – библиотеки виртуальных компонентов, значения параметров которых устанавливаются пользователем;
- **Rated Virtual Components** – виртуальные компоненты с ограничениями, которые могут быть выведены из строя ("сгорят"), если в процессе моделирования схемы на них будут подаваться сигналы с параметрами, превышающими установленные (в окне свойств каждого компонента на закладке **Value**) пользователем допустимые значения;

– **3D Virtual Parts** – трехмерные (3D) виртуальные компоненты.

После щелчка мышью на одной из 17 пиктограмм панели компонентов фирм-производителей (рис. 1.5, сверху и табл. 1.1), в от-

крывшемся окне пользователь выбирает в меню **Group** нужную ему библиотеку компонентов, например, библиотеку **Basic**, а в открывшемся окне (см. левый столбец внизу), например, компонент **Resistor** (Резистор). Во втором столбце необходимо щелкнуть мышью на значение требуемого сопротивления (например, 1к → 1 кОм), выбрать его модель (тип), процент отклонения от номинального значения и щелкнуть мышью на кнопке **OK**.

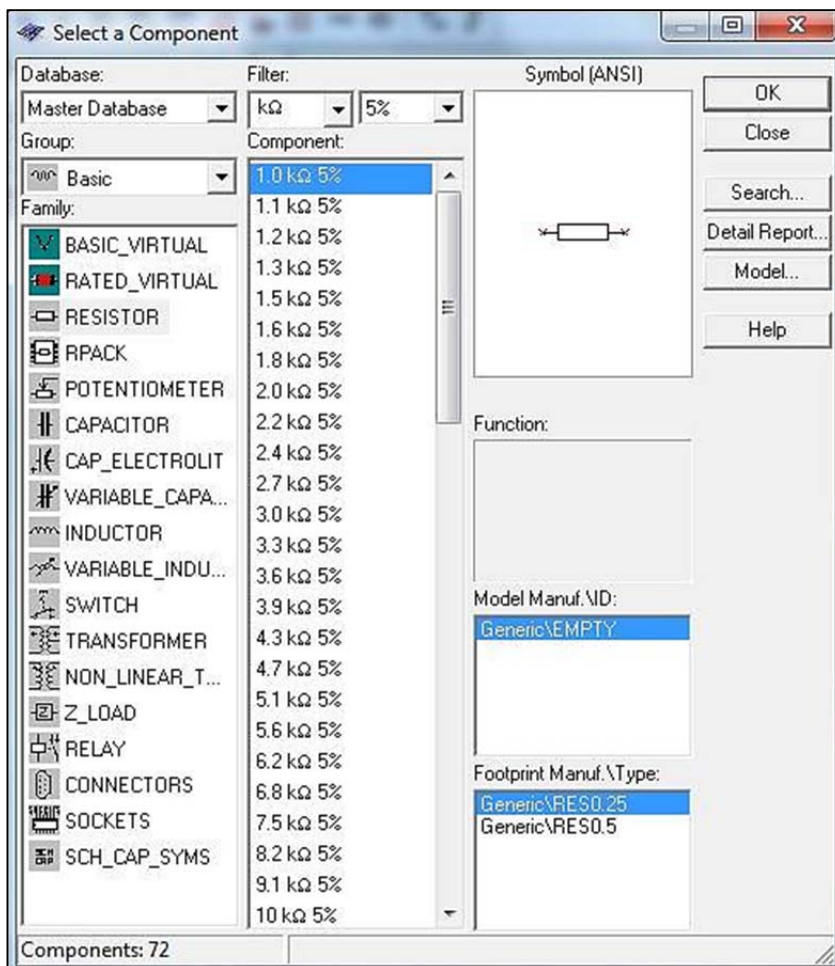


Рис. 1.5. Выбор номиналов резистора

Таблица 1.1

Пиктограммы панели компонентов

1.	Source – Источники энергии	10.	Indicator – Индикаторные устройства
2.	Basic – Базисные компоненты	11.	Power – Силовые устройства
3.	Diode – Диоды	12.	Miscellaneous – Компоненты смешанного типа
4.	Transistors – Биполярные и полевые транзисторы	13.	Advanced Peripherals – Периферийные устройства
5.	Analog – Аналоговые микросхемы	14.	RF – Радиоэлементы
6.	TTL – Логические микросхемы семейства TTL	15.	Electromecanical – Электромеханические устройства
7.	CMOS – КМОП-микросхемы	16.	MCU Modul – Функциональные узлы цифровой электроники
8.	Misc digital – Цифровые микросхемы	17.	Hierarchical Block – Блок-схемы
9.	Mixed – Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи		

Графическое изображение компонента (окно в третьем столбце вверху рис. 1.5) как бы закрепляется за курсором мыши и после щелчка мышью в любой точке рабочего поля среды MULTISIM переносится на экран. После двойного щелчка мышью на изображение компонента на рабочем поле MULTISIM в открывшемся окне-закладке можно установить другие параметры, например, температуру испытания, и принять параметры, установленные по умолчанию. Однако задать произвольное значение основного параметра (Ik) резистора нельзя, нужно заменить этот резистор на другой (опция **Replace**) и выбрать сопротивление из шкалы номиналов (рис. 1.5).

Использование этих библиотек целесообразно на завершающем этапе разработки и испытания схем электронных устройств с формированием таблиц с параметрами компонентов фирм-производителей.

На начальном этапе изучения основ электроники при сборке и испытании схем базовых узлов, и исследовании влияния параметров компонентов на получаемые характеристики устройств, удобны *библиотеки виртуальных компонентов* (рис. 1.6, верхняя строка), выводимые в инструментальную линейку после щелчка мышью на кнопке меню **View**, выбора опции **Toolbars** и щелчка мышью на закладке **Virtual**.

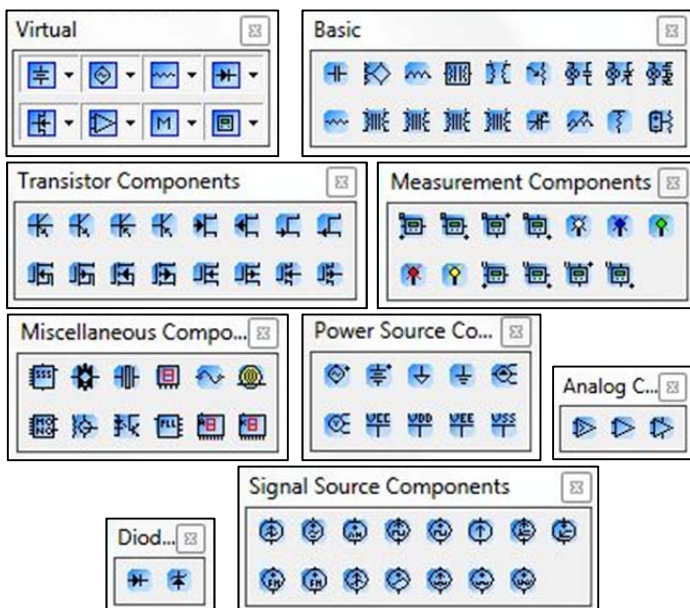


Рис. 1.6. Библиотеки виртуальных компонентов

На выведенной панели Virtual размещены следующие виртуальные библиотеки, входящие в них компоненты и устройства:

1. **Analog Components** – аналоговые микросхемы: компаратор, операционные усилители с тремя и с пятью выводами;
2. **Basic Components** – базовые компоненты: конденсатор, индуктивные элементы, трансформаторы, потенциометр, реле, резистор, конденсатор с переменной емкостью, индуктивная катушка с переменной индуктивностью и др.;
3. **Diod Components** – диоды и стабилитроны;
4. **Transistor Components** – транзисторы биполярные и нулевые;
5. **Measurement Components** – измерительные приборы: амперметры, вольтметры, световые индикаторы;
6. **Miscellaneous Components** – устройства смешанного типа: таймер 555, выключатели, предохранители, лампа накаливания, двигатель постоянного тока, семисегментовые индикаторы;
7. **Power Source Components** – источники напряжения, трехфазные генераторы, источники питания цифровых устройств, заземление;

8. **Rated Virtual Components** – виртуальные компоненты с ограничениями параметров и с выбором скорости выхода из строя при превышении установленных параметров (**Animation Delay Factor** – Множитель задержки для анимации; параметр не имеет отношение к процессам реального времени): транзисторы, конденсатор, диод, катушка индуктивности, двигатель постоянного тока, реле трех типов, резистор;

Signal Source Components – генераторы: синусоидального напряжения и тока, амплитудно-модулированных сигналов (тока и напряжения), тока и напряжения специальных форм (в виде меандра, прямоугольных, экспоненциальных и линейно нарастающих импульсов).

1.1.3. Измерительные приборы, источники питания и устройство визуализации. Справа от рабочего окна (поля) программы после щелчков мышью на пиктограммах команд Simulate/Instruments выводится вертикальная линейка кнопок-пиктограмм источников питания, разнообразных измерительных приборов и осциллографов (рис. 1.7).

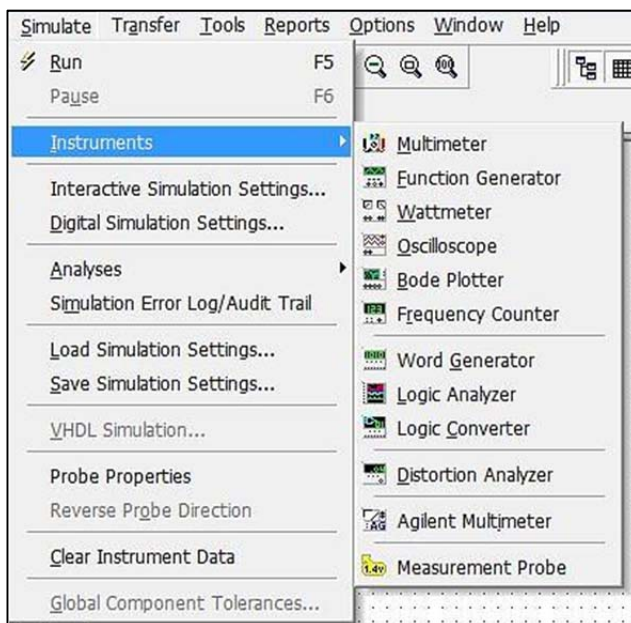


Рис. 1.7. Диалоговое окно «Simulate/Instruments»

Для подключения прибора к схеме нужно щелкнуть мышью на пиктограмме прибора, затем на рабочем поле программы **MULTISIM** и подключить выводы прибора к узлам схемы. Некоторые приборы нужно заземлить (подключить к общей точке), иначе их показания будут неверными.

Расширенное изображение прибора выводится на рабочее поле после двойного щелчка мышью на его уменьшенное изображение или после выполнения команд **Tools/Zoom**. Закрыть увеличенное окно прибора можно щелчком мыши на кнопке **Close**, расположенной в правом верхнем углу окна.

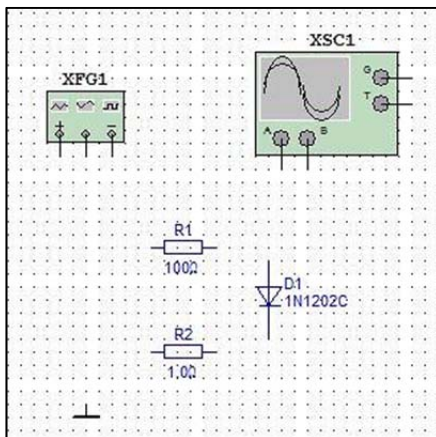
1.1.4. Технология сборки схем. Процесс создания схем испытания электронных узлов и устройств начинается с "переноса" и размещения на рабочем поле среды **MULTISIM** нужных компонентов и приборов из ее библиотек и последующего их соединения «проводниками» между собой. Библиотека раскрывается после щелчка мышью на ее пиктограмме.

Процесс "перетаскивания" на рабочее поле номинированного компонента описан в п. 2. Чтобы "*перетащить*" виртуальный компонент или прибор на рабочее поле, нужно поместить указатель (курсор) мыши на изображение компонента и щелкнуть левой клавишей. Затем выбрать место на рабочем поле и щелкнуть мышью. Для *перемещения* компонента в другое место рабочего поля необходимо нажать левую клавишу мыши на его изображение и, не отпуская клавишу, передвинуть компонент в нужное место. Для *более точного расположения* элемента или прибора его нужно выделить, а затем переместить, нажимая на соответствующие клавиатурные клавиши (со стрелками) управления курсором.

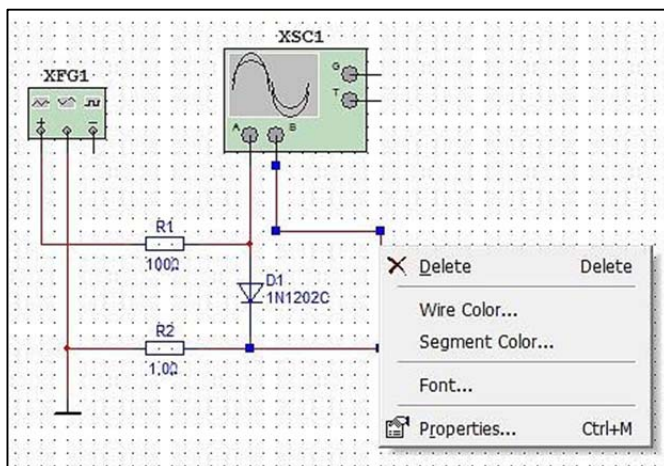
Для *соединения выводов (зажимов)* элементов и/или приборов нужно подвести курсор мыши к концу требуемого вывода (при этом указатель (стрелка) мыши преобразуется в небольшой кружок-точку), щелкнуть левой клавишей (или нажать левую клавишу и переместить тянущуюся за курсором линию к требуемому выводу другого компонента до появления на его конце точки (рис. 1.8)). После щелчка на точке мышью два вывода будут соединены линией («проводником»). Аналогично можно соединить любой вывод элемента (прибора) с любым проводником, на котором появляется (при соединении) точка.

Следует отметить, что прокладка соединительных проводников производится автоматически, причем препятствия – компоненты

и другие проводники – огибаются по ортогональным направлениям (по горизонтали или по вертикали). Если необходимо переместить отдельный сегмент проводника, к нему подводится курсор мыши, нажимается левая клавиша и, после выделения проводника, производится нужное перемещение.



a



б

Рис. 1.8. Пример выполнения соединений выводов (зажимов) элементов схемы

Для *разрыва проводника* нужно подвести курсор мыши к требуемому выводу компонента до появления крестика, щелкнуть мышью на крестике, а затем щелкнуть два раза на свободном пространстве поля. В этом месте на конце отсоединенного проводника появится точка, используя которую в дальнейшем можно соединить этот проводник с другим выводом любого компонента или с другим проводником. С другой стороны, если подвести курсор к концу вывода, щелкнуть мышью на появившемся крестике, подвести курсор к другому выводу и щелкнуть на нем, то получим новое присоединение этого вывода.

Чтобы *удалить* проводник, нужно щелкнуть на нем правой клавишей мыши (на концах соединений этого проводника появятся квадратики), и в открывшемся окне щелкнуть левой клавишей мыши на опции **Delete** (см. рис. 1.8, б) или нажать на клавиатурную клавишу **Del**. В этом же окне размещены опции выбора цвета проводника (**Segment Color**) и выбора шрифта (**Font**) его номера. Если выбрать *синий* и *красный* цвета проводов, подходящих к входам осциллографа, логического анализатора и др., то графики кривых на экранах указанных приборов окрашиваются в заданные цвета.

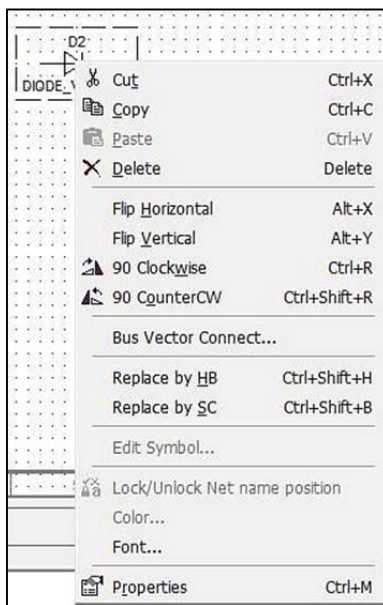
Выделенную мышью *группу компонентов* с нажатой левой клавишей можно перемещать и удалять аналогично перемещению и удалению одного элемента. Для выделения всей схемы (кадра) нужно щелкнуть мышью на опции **Select All** в меню **Edit**. Для *поворота компонента*, например на 90° , его нужно выделить и нажать (одновременно) клавиатурные клавиши **Ctrl+R**.

Для *установки* требуемых параметров элемента или прибора нужно навести на его изображение курсор мыши и щелкнуть два раза левой клавишей. В появившемся окне (рис. 1.9, а) можно изменить (с помощью закладки **Value**) значения параметров прибора (в данном примере диода VD1), его буквенное обозначение (закладка **Label**), после чего нужно подтвердить (нажать кнопку **OK**) или отменить (**Cancel**) выбранные значения (установку) параметров.

Чтобы *изменить цвет* компонента, нужно навести курсор мыши и щелкнуть на изображение компонента правой клавишей. В появившемся окне (рис. 1.9, б), щелкая мышью на соответствующих закладках, в открывающихся окнах можно выбрать цвет (**Change Color**) компонента, вырезать (**Cut**) или удалить (**Delete**) его, выполнить другие операции, относящиеся к этому компоненту.



а



б

Рис. 1.9. Изменение цвета компонента

Предусмотрена возможность изменения параметров *интерактивных* компонентов, управляемых буквенными или цифровыми клавиатурными клавишами (*английский шрифт*). Так, для изменения сопротивления потенциометра R1 нужно кратковременно нажимать на назначенную в закладке **Key** клавишу **A** (рис. 1.10). При этом дискретно уменьшается (в данном случае на 5 %) значение сопротивления предварительно выделенного (см. пунктирную рамку на рис. 1.10) потенциометра. При одновременном нажатии клавиш **Shift+A** сопротивление потенциометра R1 увеличивается.

Изменение параметров, приведенных на рис. 1.10 компонентов, можно осуществить также с помощью движков, которые всплывают при подведении указателя мыши к надписи **Key**: при перемещении мышью движка влево/вправо уменьшается/увеличивается значение параметра соответствующего компонента.

Таким образом, параметры компонентов схемы можно изменять, не прерывая процесс моделирования и наблюдения за изменениями

параметров (по показаниям приборов) и кривых зависимостей электрических величин от времени на экране осциллографа.

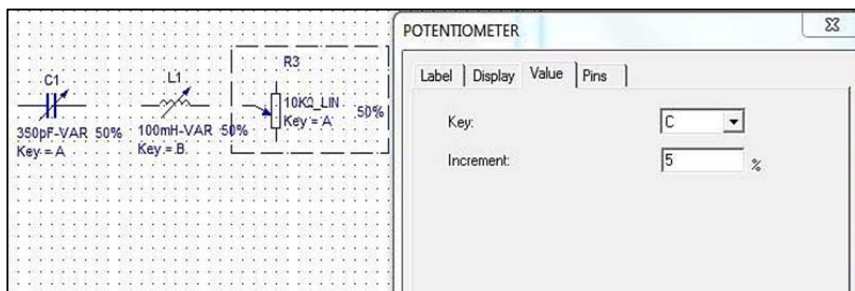


Рис. 1.10. Изменение параметров интерактивных компонентов

Для **управления** измерительными приборами и **снятия** показаний необходимо навести курсор мыши на изображение соответствующего прибора и нажать два раза левой клавишей мыши. Появится увеличенное изображение панели прибора с закладками установки параметров и режимов его работы. С помощью визирных линий (визиров), расположенных слева и справа в окне осциллографа или плоттера, можно получить координаты точек на снимаемых временных, частотных или вольт-амперных характеристиках электронных устройств.

1.2. Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом можно подключить вывод компонента к измерительному прибору?
2. Составьте схему цепи, состоящей из последовательно включенных батареи напряжением 5 В и переменного резистора сопротивлением 10 кОм, включенного потенциометром. Между подвижным контактом потенциометра и одним из зажимов батареи включите вольтметр. Изменяя положение подвижного контакта нажатием назначенной Вами клавишей клавиатуры, по показаниям вольтметра определите направление его перемещения.
3. Подготовьте схему цепи, состоящей из источника переменного синусоидального напряжения и вольтметра. Установите напряжение источника 10 В. Полагая, что вольтметр измеряет эффективное значение напряжения, выясните, какому значению соответствует

установленное напряжение источника – эффективному или амплитудному. Объясните, почему вольтметр имеет нулевые показания в режиме измерения постоянного тока?

4. Составьте схему цепи, состоящей из последовательно включенных источника постоянного тока, амперметра и потенциометра 10 кОм, включенного в режиме переменного сопротивления (к схеме подключается вывод подвижного контакта и одного из неподвижных). Изменяя сопротивление резистора назначенной клавишей, убедитесь, что ток в цепи не меняется. Объясните почему?

5. Соберите цепь, состоящую из источника постоянного тока и предохранителя, установив ток срабатывания 10 мА. Изменяя ток источника, установите факт срабатывания предохранителя при указанном значении тока.

6. Подключите вольтметр к генератору прямоугольных импульсов, установив амплитуду выходного сигнала 10 В. Почему измеряемое вольтметром напряжение равно половине установленного как в режиме измерения постоянного, так и переменного тока? Сделайте вывод о форме выходного сигнала генератора.

7. Подготовьте схему цепи, состоящей из последовательно включенных источника постоянного напряжения, резистора 1 кОм и стабилитрона. Параллельно стабилитрону подключите вольтметр. Установите зависимость напряжения на стабилитроне от напряжения источника. Полученное напряжение стабилизации сравните со значениями параметров модели стабилитрона.

8. Соберите схему, состоящую из батареи и лампы накаливания. Определите напряжения, при которых лампа зажигается и перегорает.

1.3. Рекомендуемая литература

1. Никонова, В. Г. Моделирование электронных узлов в Multisim : учебное пособие / В. Г. Никонова. – Омск : ОмГТУ, 2010. – 82 с.

2. Шестеркин, А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств в Multisim 10 / А. Н. Шестеркин. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 360 с.

3. Марченко, А. Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

Лабораторная работа № 2

ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Цель работы. Изучить схемы и принципы работы основных функциональных узлов вторичных источников питания, провести экспериментальные исследования их характеристик.

Используемое оборудование и средства. Персональный компьютер, программа Multisim.

Методические указания. Работа выполняется студентами за четыре часа аудиторных занятий.

2.1. Краткие теоретические сведения

2.1.1. Структура источников питания. Для стационарного оборудования, как правило, требуется преобразование стандартного электропитания переменного тока (220 В, 50 Гц) в напряжение постоянного тока. Существуют три типа преобразователей:

- нерегулируемый;
- регулируемый;
- импульсный.

Простой нерегулируемый источник питания (рис. 2.1). Трансформатор преобразовывает входное переменное напряжение в низкое выходное напряжение (обычно от 6 до 24 В). Далее низкое переменное напряжение подается на выпрямитель. На выходе выпрямителя протекает пульсирующий прерывный ток. Подключенный параллельно выходу конденсатор сглаживает пульсации. На рис. 2.1 и последующих рисунках приняты следующие обозначения: AC – Alternating Current (переменный ток); DC – Direct Current (постоянный ток).

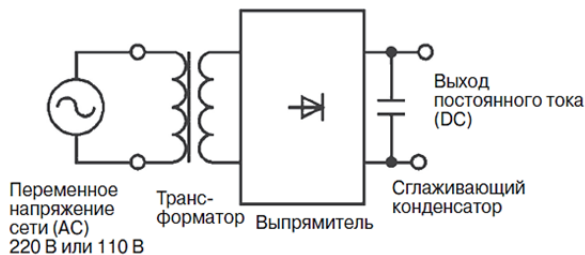


Рис. 2.1. Схема простого нерегулируемого источника питания

Регулируемый источник питания (рис. 2.2, а) отличается от предыдущего тем, что в его конструкцию добавлен электронный регулятор выходного напряжения (рис. 2.2, б). Задача регулятора – создать стабильное требуемое выходное напряжение.

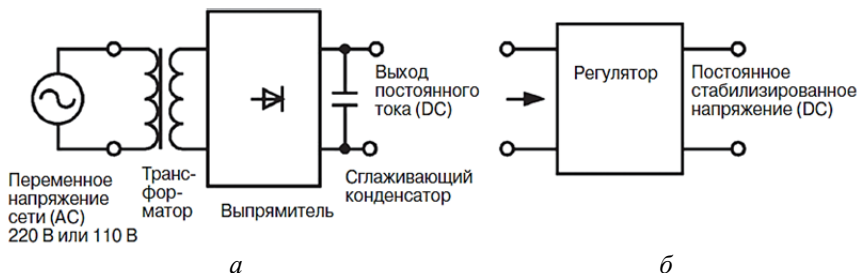


Рис. 2.2. Схема регулируемого источника питания (а) и символическое обозначение структуры блока регулятора (б)

Импульсный источник питания (рис. 2.3). В таких источниках питания используется прерыватель, который преобразует входное напряжение частотой 50 или 60 Гц в высокочастотное напряжение (обычно от 20 до 500 кГц). Высокочастотное напряжение преобразуется импульсным трансформатором в напряжение требуемой величины, затем выпрямляется и сглаживается. Преимущество импульсного источника питания в том, что нет необходимости в использовании громоздкого и тяжелого низкочастотного трансформатора. Трансформаторы, которые работают на частоте 20 кГц и более, в несколько раз меньше по габаритам и массе, чем низкочастотные.

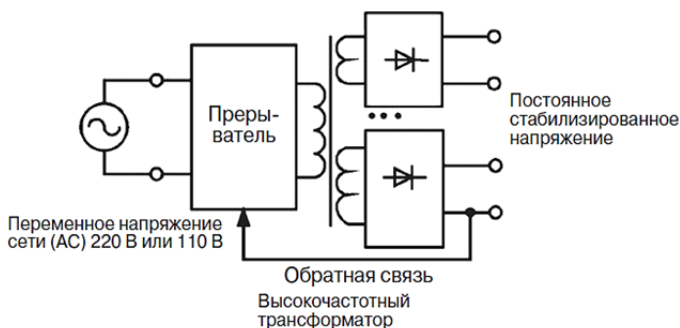


Рис. 2.3. Структура импульсного источника питания

2.1.2. Полупроводниковые выпрямители напряжения. Выпрямителем называется электронное устройство для преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока. Выпрямители могут быть однополупериодными и двухполупериодными. На рис. 2.4 представлена эквивалентная электрическая схема (а) и временная диаграмма работы (б) однополупериодного полупроводникового выпрямителя.

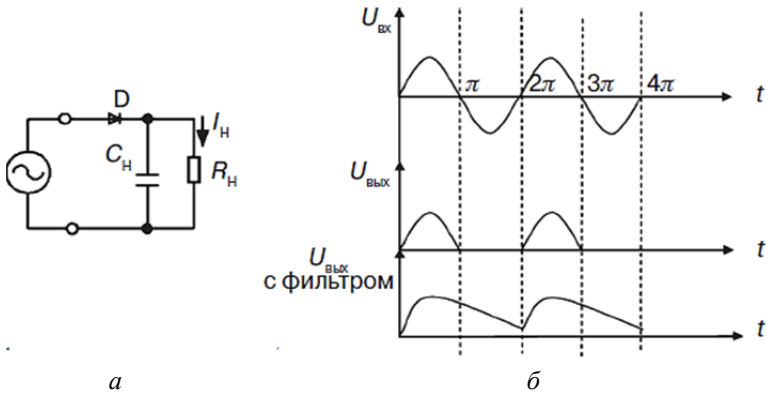


Рис. 2.4. Эквивалентная схема однополупериодного выпрямителя (а) и временные диаграммы его работы (б)

Кратко опишем его работу. В первый полупериод диод D выпрямителя находится в открытом состоянии и проводит ток. Во втором полупериоде – не проводит. Конденсатор емкостью C_n сглаживает пульсации выходного напряжения.

Пульсации выходного напряжения однополупериодного выпрямителя определяются выражением:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C_n} = \frac{I_n \cdot T}{C_n} = \frac{I_n}{f \cdot C_n}, \quad (2.1)$$

где ΔQ – изменение заряда выходной емкости;

C_n – значение выходной емкости;

I_n – ток нагрузки;

f – частота напряжения сети переменного тока;

T – период напряжения сети.

Выпрямленное напряжение U_n содержит постоянную составляющую U_0 , первую U_{1m} и высшие гармоники. Среднее значение первой гармоники для рассматриваемого выпрямителя за полупериод равно

$$U_{0(T/2)} \approx 0,63U_{1m} \approx 0,45U_{ЭФ}. \quad (2.2)$$

Коэффициент пульсации, представляющий собой отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей, для однопериодного выпрямителя с учетом (2.2) будет равен:

$$K_{П(T/2)} = U_{1m} / U_{0(T/2)} = 1,57.$$

На рис. 2.5 представлена эквивалентная электрическая схема (а) и временная диаграмма работы (б) однопериодного управляемого выпрямителя. В момент времени равный t_1 тиристор включается и остается проводящим до времени π (время полупериода работы выпрямителя).

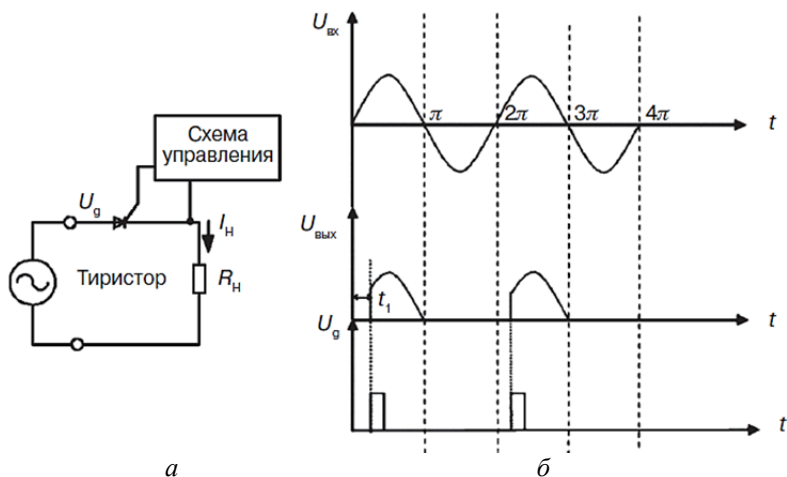


Рис. 2.5. Однополупериодный управляемый выпрямитель

В течение второго полупериода тиристор смещен в обратном направлении и не проводит ток. При увеличении угла включения

(времени включения) среднее выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ уменьшается, так как тиристор находится во включенном состоянии меньшее время. Моментом включения тиристора можно управлять посредством регулировки времени включения, что на практике осуществляется схемой управления (рис. 2.5, а).

Для улучшения параметров выпрямителя применяется мостовая схема выпрямления. На рис. 2.6 представлены эквивалентная электрическая схема (а) и временная диаграмма работы (б) двухполупериодного выпрямителя, который работает следующим образом.

В течение положительного полупериода напряжения диод $D1$ (рис. 2.6, а) смещен в прямом направлении и проводит ток. Ток при этом протекает от вывода обмотки A трансформатора, помеченного точкой, через диод $D1$, нагрузку R_H и вывод обмотки A , не помеченный точкой.

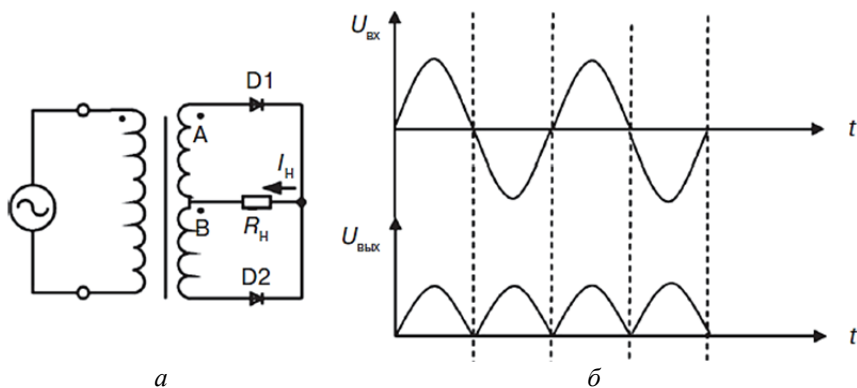


Рис. 2.6. Эквивалентная электрическая схема (а) и временная диаграмма работы (б) двухполупериодного выпрямителя

В течение отрицательного полупериода напряжения диод $D2$ смещен в прямом направлении и также проводит ток. При этом ток протекает от вывода обмотки трансформатора, не помеченного точкой, через диод $D2$, нагрузку R_H и вывод обмотки B , помеченный точкой.

Направление тока в нагрузке и полярность выходного напряжения остаются теми же, что и при положительном полупериоде.

Недостаток такого выпрямителя – необходимость использования двух вторичных обмоток трансформатора, рассчитанных на одно напряжение.

Численное значение величины пульсации выходного напряжения ΔU двухполупериодного выпрямителя определяется выражением

$$\Delta U = \frac{I_H}{2f \cdot C_H}. \quad (2.3)$$

На рис. 2.7 представлены эквивалентная электрическая схема (а) и временная диаграмма работы (б) мостового двухполупериодного выпрямителя.

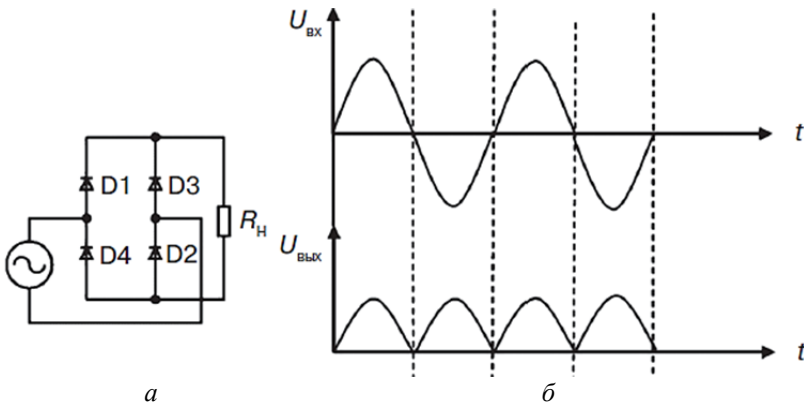


Рис. 2.7. Эквивалентная электрическая схема (а) и временная диаграмма работы (б) мостового двухполупериодного выпрямителя

В течение положительного полупериода диоды $D1$ и $D2$ смещены в прямом направлении. В течение отрицательного полупериода диоды $D3$ и $D4$ смещены в прямом направлении.

Численные значения величин пульсаций выходного напряжения такого мостового двухполупериодного выпрямителя также определяются выражением (2.3). Учитывая, что ток в нагрузке для мостовой схемы протекает в течение обоих полупериодов, то постоянная составляющая выпрямленного напряжения будет в два раза больше, чем для однополупериодного выпрямителя, т. е.

$$U_{0(T)} = 2U_{0(T/2)} = 1,26U_{1m}, \quad (2.4)$$

тогда $K_{П(T)} = U_{1m} / U_{0(T)} = 0,78$.

Если вместо диодов $D1$ и $D4$ использовать тиристоры, то получается управляемый двухполупериодный выпрямитель. Различные типы управляемых выпрямителей детально описаны в книге [1].

В ряде случаев, когда потребляемая от выпрямителя мощность небольшая, применяют схемы умножения напряжения. Одна из схем удвоения напряжения приведена на рис. 2.8.

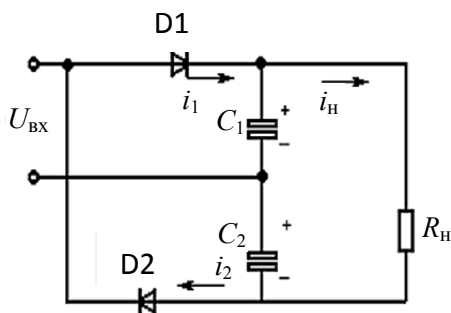


Рис. 2.8. Схема удвоения напряжения

При положительных полуволнах ток i_1 заряжает конденсатор C_1 через диод $D1$, а при отрицательных – ток i_2 заряжает конденсатор C_2 через диод $D2$. Общее напряжение на конденсаторах C_1 и C_2 , включенных последовательно, обеспечивает протекание тока через нагрузку $R_н$.

2.1.3. Стабилизаторы напряжения. У нестабилизированных источников питания при увеличении тока нагрузки постоянная составляющая напряжения на выходе источника падает, а напряжение пульсации растет. Для устранения этого недостатка служат стабилизаторы напряжения. Современный линейный стабилизатор напряжения – это микросхема, на вход которой подается нестабилизированное напряжение, а на выходе формируется требуемое стабилизированное напряжение. У идеального стабилизатора значение выходного напряжения не зависит от изменений входного напряжения, тока нагрузки, температуры, времени.

Электронные стабилизаторы постоянного напряжения подразделяются на параметрические, компенсационные и комбинированные.

Принцип работы *параметрического стабилизатора напряжения* (рис. 2.9) заключается в поддержании постоянного напряжения на

сопротивлении нагрузки R_H . При изменении входного напряжения $U_{ВХ}$, за счет перераспределения токов, протекающих через линейный R_6 и нелинейный VD (стабилитрон) элементы.

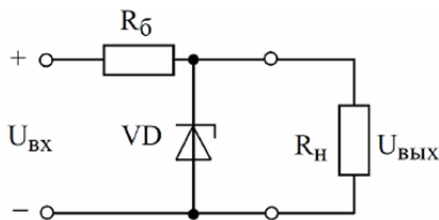


Рис. 2.9. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Коэффициент стабилизации рассчитывается в соответствии с выражением

$$K_{СТ} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{U_{ВХ}} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}}, \quad (2.43)$$

где $\frac{\Delta U_{ВХ}}{U_{ВХ}}$ и $\frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}}$ – относительные изменения входного и выходного напряжений.

Принцип действия *компенсационного стабилизатора напряжения* основан на изменении сопротивления регулирующего элемента в зависимости от управляющего сигнала. Компенсационный стабилизатор относят к стабилизаторам непрерывного действия, представляющих собой устройство автоматического регулирования, которое с заданной точностью поддерживает напряжение на нагрузке независимо от изменения входного напряжения и тока нагрузки. Различают стабилизаторы последовательного и параллельного типа.

Структурная схема компенсационного стабилизатора последовательного типа представлена на рис. 2.10, а. Регулирующий элемент (Р) включен последовательно с нагрузкой и играет роль управляемого балластного сопротивления. Опорное стабилизированное напряжение формируется источником опорного напряжения (И). Схема сравнения (ЭС) сопоставляет выходное напряжение U_H с опорным напряжением $U_{оп}$. Разностный сигнал рассогласования ($U_H - U_{оп}$),

формируемый ЭС, поступает на вход усилителя постоянного тока $У$, усиливается и воздействует на РЭ.

Если в нагрузке оказывается напряжение U_1 большее, чем опорное $U_{оп}$ – имеет место положительный сигнал рассогласования $(U_1 - U_{оп}) > 0$, тогда внутреннее сопротивление РЭ возрастает и падение напряжения $U_{рз}$ на нем увеличивается. Так как регулирующий элемент и нагрузка включены последовательно, то при увеличении $U_{рз}$ выходное напряжение уменьшается.

При уменьшении выходного напряжения U_H и отрицательном сигнале рассогласования $(U_H - U_{оп}) < 0$, внутреннее сопротивление РЭ и падение напряжения на нем уменьшаются, что приводит к возрастанию выходного напряжения U_H .

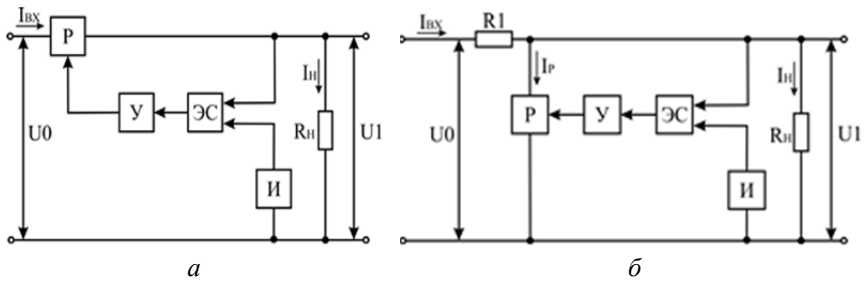


Рис. 2.10. Структурная схема компенсационного стабилизатора последовательного (а) и параллельного (б) типов:

Р – регулирующий элемент; И – источник опорного напряжения; ЭС – элемент сравнения; У – усилитель постоянного тока

В схеме параллельного стабилизатора (рис. 2.10, б), при отклонении напряжения на выходе от номинального, выделяется сигнал рассогласования, равный разности опорного и выходного напряжений. Далее он усиливается и воздействует на регулирующий элемент, включенный параллельно нагрузке. Ток регулирующего элемента I_p изменяется, на сопротивлении резистора R_1 изменяется падение напряжения, а напряжение на выходе $U_1 = U_0 - I_{вх}R_1 = \text{const}$ остается стабильным.

Схемотехническая реализация компенсационного стабилизатора последовательного и параллельного типов приведена на рис. 2.11, а и б соответственно.

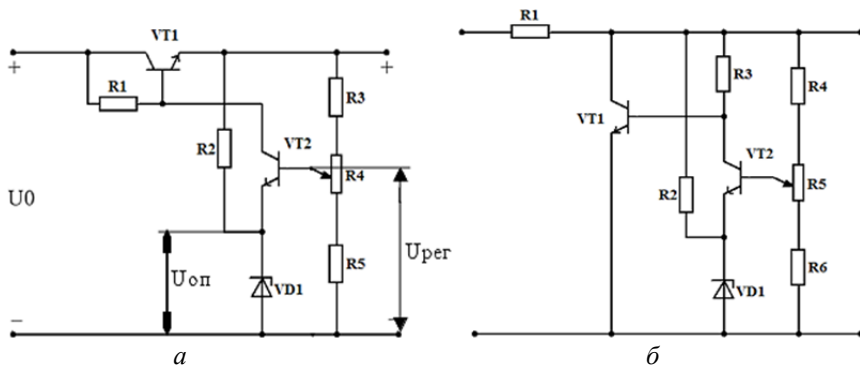


Рис. 2.11. Схемы простого компенсационного стабилизатора последовательного (а) и параллельного (б) типов

Схемотехническая реализация простейших источников опорного напряжения. Варианты построения простейших источников опорного напряжения, представленные на рис. 2.12, могут быть выполнены на диодах в прямом включении (а), МОП-транзисторах в диодном включении (б) или на стабилитроне (в).

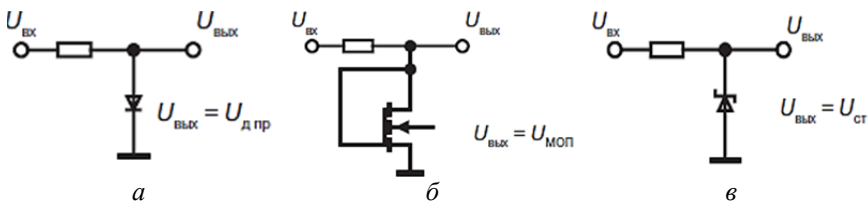


Рис. 2.12. Эквивалентные электрические схемы простейших источников опорного напряжения на диодах в прямом включении (а), МОП-транзисторах в диодном включении (б) и на стабилитроне (в)

Поскольку эти простейшие источники опорного напряжения не обладают удовлетворительной температурной стабильностью, они в основном и предназначены для применения в электрических цепях формирования статического смещения. В настоящее время данные источники опорного напряжения используются редко, их заменили более прогрессивные схемотехнические решения, которые подробно рассмотрены, например, в [1].

2.2. Контрольные вопросы и задания

1. Назовите назначение вторичных источников питания.
2. Какова функция силовых трансформаторов.
3. Для чего применяется мостовая схема выпрямления.
4. Для чего применяются сглаживающие фильтры.
5. Поясните принцип работы стабилизаторов. Нарисуйте функциональные схемы.
6. Проведите исследование однополупериодного выпрямителя, для чего соберите схему, приведенную на рис. 2.4, а.

Используйте:

- идеальные модели трансформатора и диода;
- источник переменного напряжения 12 В/60 Гц;
- $C = 10$ мкФ;
- $R_H = 100$ Ом.

Источник и нагрузку необходимо заземлить.

На вход А осциллографа подайте напряжение с анода диода, а на вход В – напряжение, снимаемое с R_H . Осциллограф заземлите.

К выходу схемы R_H подключите мультиметр.

Зарисуйте осциллограммы $U_{вх}$ (канал А) и $U_{вых}$ (канал В) с указанием их амплитудных значений.

Сравните полученные осциллограммы с графиками на рис. 2.4, б.

Измерьте и запишите постоянную U_0 и переменную U_{1m} составляющие выходного напряжения.

Рассчитайте постоянную составляющую U_0 и коэффициент пульсаций $K_{П}$. Используйте формулы (2.5) и (2.6).

$$U_0 = 2U_{1m} / \pi, \quad (2.5)$$

$$K_{П} = U_{1m} / U_0. \quad (2.6)$$

Сравните экспериментальные значения $U_{0Э}$ и $K_{ПЭ}$ с теоретическими значениями этих величин ($U_{0Т} = 0,45 U_{ЭФ}$, $K_{ПТ} = 1,57$).

Проверьте влияние фильтра на форму выходного напряжения схемы и на величину коэффициента пульсаций. Для этого повторите исследования для следующих значений емкости фильтра: $C_{Ф1} = 50$ мкФ, $C_{Ф2} = 100$ мкФ, $C_{Ф3} = 200$ мкФ, $C_{Ф4} = 300$ мкФ.

Зарисуйте осциллограммы для каждого значения емкости фильтра $C_{Ф}$.

7. Проведите исследование схемы мостового выпрямителя.

Соберите схему, приведенную на рис. 2.7, а. Используйте:

- модель идеального трансформатора и мостовую сборку диодов;
- источник переменного напряжения 120 В/60 Гц;
- $R_n = 100$ Ом.

Источник питания и нагрузку заземлите.

Выполните методику, изложенную в пункте 6. Сравните осциллограммы с графиками (рис. 2.6, б).

Рассчитайте постоянную составляющую выпрямленного напряжения и коэффициент пульсаций без фильтра по формулам (2.7), (2.8).

$$U_{0Э} = 4U_{1m} / \pi, \quad (2.7)$$

$$K_{ПЭ} = U_{1m} / U_0. \quad (2.8)$$

Сравните расчетные результаты с теоретическими значениями ($U_{0Т} = 0,9 U_{ЭФ}$, $K_{ПТ} = 0,78$).

8. Проведите исследование схемы удвоения напряжения. Соберите схему (рис. 2.8). Используйте:

- модели идеальных диодов;
- модели электролитических конденсаторов $C1 = 500$ мкФ, $C2 = 500$ мкФ;
- $R_n = 100$ Ом.

– источник переменного напряжения 120 В/60 Гц. Источник переменного напряжения и R_n заземлите.

Выполните методику, изложенную в пункте 6. При расчетах используйте формулы, приведенные в пункте 7.

9. Проведите исследования параметрического стабилизатора напряжения.

Соберите схему, приведенную на рис. 2.10, в которой установите $R_{орг} = 0,2$ кОм; $R_n = 0,5$ кОм.

В качестве входного напряжения $U_{вх}$ подключите источник постоянного напряжения $E = 30$ В и заземлите его.

Подключите амперметры для измерения токов, протекающих через резистор $R_{орг}$, стабилизатор и нагрузку R_n , $I_{орг}$, I_c и I_n , соответственно.

Подключите вольтметр для измерения напряжения на сопротивлении нагрузки (U_n).

Изменяя величину E от 30 В до 50 В с шагом 1 В, заполните табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты исследования параметрического стабилизатора

$E, \text{В}$	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$I_{\text{орг}}, \text{А}$	$I_{\text{с}}, \text{А}$	$I_{\text{н}}, \text{А}$

Используя выражение (2.4), определите коэффициент стабилизации.

Постройте графики зависимостей $U_{\text{н}}(U_{\text{вх}})$, $I_{\text{орг}}(U_{\text{вх}})$, $I_{\text{с}}(U_{\text{вх}})$, $I_{\text{н}}(U_{\text{вх}})$.

10. Проведите исследования компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа. Предусмотрите плавную регулировку выходного напряжения в пределах от 12 В до 16 В.

Соберите схему, приведенную на рис. 2.12, а, в которой установите $U_0 = 24 \text{ В}$, $U_{\text{оп}} = 8 \text{ В}$, $R1 = 140 \text{ Ом}$, $R2 = 600 \text{ Ом}$.

Плавную регулировку выходного напряжения можно осуществить, используя опорное напряжение, снимаемое с цепочки последовательно включенных стабилитронов. Плавная регулировка обычно производится с помощью делителя напряжения $R3$, $R4$, $R5$, включенного в выходную цепь стабилизатора. Для рассматриваемой схемы установите следующие значения: $R3 = 2 \text{ кОм}$, $R4 = 2 \text{ кОм}$, $R5 = 4 \text{ кОм}$.

Подключите амперметры для измерения токов, протекающих через резистор ($I_{\text{дел}}$). Подключите вольтметр для измерения напряжения на сопротивлении нагрузки ($U_{\text{н}}$). Изменяя сопротивление переменного резистора $R4$ с помощью клавиш [R] (↓) и [Shift]+[R] (↑), установите на нагрузке напряжение $U_{\text{н}} = 6 \text{ В}$.

Подключите осциллограф и сравните напряжение на выходе стабилизатора при различных параметрах элементов.

2.3. Рекомендуемая литература

1. Белоус, А. И. Полупроводниковая силовая электроника / А. И. Белоус, С. А. Ефименко, А. С. Турцевич. – М. : Техносфера, 2013. – 216 с.

2. Остапенкова, О. Н. Расчет источников вторичного питания электронных устройств : учебное пособие / О. Н. Остапенкова. – М. : ИНФРА-М, 2013. – 97 с.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Цель работы. Изучить схемы и принципы работы основных функциональных узлов импульсных источников питания, провести экспериментальные исследования их характеристик.

Используемое оборудование и средства. Персональный компьютер, программа Multisim.

Методические указания. Работа выполняется студентами за два часа аудиторных занятий

3.1. Краткие теоретические сведения

Импульсный источник питания – это источник, в котором энергия первичного источника питания передается через регулирующий элемент определенными порциями, заданными контуром регулирования так, чтобы стабильным было среднее значение выходного напряжения. Сглаживание пульсаций выходного напряжения происходит благодаря наличию элемента или сочетания элементов, способных накапливать электрическую энергию и отдавать ее в нагрузку.

Основное достоинство импульсных источников питания заключается в их способности обеспечить большую мощность в нагрузке, имея при этом высокий коэффициент полезного действия (КПД) и малые габариты. В отличие от линейных стабилизаторов, в импульсных источниках питания проходной транзистор переключается с большой частотой (от 20 кГц до 5,0 МГц). Ключевой транзистор коммутирует индуктивный элемент (обмотку трансформатора либо дроссель), в котором накапливается энергия, пропорциональная времени открытого состояния транзистора. После закрытия ключевого транзистора энергия, накопленная в индуктивном элементе, передается в нагрузку. Благодаря тому, что на проходном транзисторе не происходит падения напряжения $U_{вх} - U_{вых}$, импульсные источники питания рассеивают гораздо меньшую мощность по сравнению с линейными стабилизаторами. Таким образом, импульсные источники питания имеют более высокий КПД (до 70–95 %). Частота переключения транзисторов может достигать сотен кГц, что

позволяет значительно снизить габариты и вес трансформатора и фильтрующих конденсаторов, а соответственно и самого источника.

3.1.1. Управление регулирующим элементом в импульсных ИП. Несмотря на большое разнообразие схем импульсных источников питания, все они разделяются по способу управления регулирующим элементом на две группы: ИП с широтно-импульсной (или частотной модуляцией) и ИП с релейным управлением регулирующим элементом.

Принцип действия ИП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) заключается в следующем (рис. 3.1).

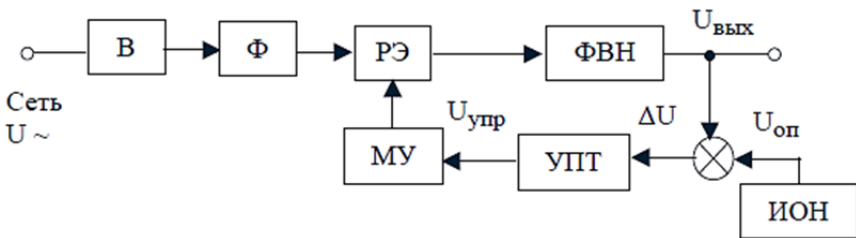


Рис. 3.1. Импульсный источник питания с ШИМ:

В – выпрямитель; Ф – низкочастотный сглаживающий фильтр;
 РЭ – регулирующий элемент; ФВН – формирователь выходного напряжения;
 МУ – модулирующее устройство; УПТ – усилитель постоянного тока;
 ИОН – источник опорного напряжения

Выпрямление напряжения питающей сети переменного тока сглаживается фильтром низкой частоты и передается в формирователь выходного напряжения через электронный ключ (регулирующий элемент), в качестве которого в подавляющем большинстве случаев используется транзистор. Выходное напряжение зависит от энергии, передаваемой в ФВН в единицу времени и нагрузки ИП.

Регулирующий элемент осуществляет управление процессом передачи энергии от питающей сети к ФВН. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ сравнивается с опорным напряжением $U_{\text{оп}}$ и сигнал разности $\Delta U = U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}}$ через УПТ поступает на модулирующее устройство, преобразующее сигнал постоянного тока в импульсы с различной длительностью и постоянным периодом. Длительность импульсов управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ функционально связана с разностью напряжений ΔU . С МУ сигнал поступает на РЭ, кото-

рый периодически переключается. Таким образом, выходное напряжение ИП зависит, при неизменном периоде, от длительности управляющих импульсов. Процесс широтно-импульсной модуляции поясняется на рис. 3.2.

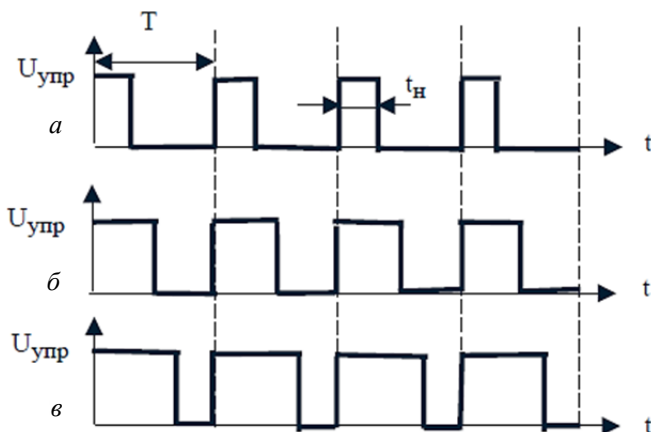


Рис. 3.2. Импульсный источник питания с широтно-импульсной модуляцией:
 $t_{и} = 0,25 \cdot T$ (а), $t_{и} = 0,50 \cdot T$ (б), $t_{и} = 0,75 \cdot T$ (в)

При изменении мощности, отдаваемой ИП в нагрузку, изменяется соотношение длительности импульса $t_{и}$ и периода следования импульсов $U_{упр}$. На рис. 3.2 показаны диаграммы $U_{упр}$ для различных значений мощности, отдаваемой в нагрузку P_n : рис. 3.2, а соответствует самому малому значению P_n , рис. 3.2, б – среднему P_n , рис. 3.2, в – большему значению P_n .

Один из широко используемых способов изменения ширины импульсов поясняется на рис. 3.3. Схема управления регулирующим элементом содержит генератор вспомогательного линейно-изменяющегося напряжения $U_{лин}$. Это напряжение сравнивается с $U_{вых}$. Независимо от вида вспомогательного напряжения (линейно-нарастающее или линейно-спадающее) переключение уровня напряжения $U_{упр}$ осуществляется в момент времени, когда $U_{лин} = U_{вых}$. Причем в любом случае, когда $U_{вых} < U_{лин}$, формируется сигнал $U_{упр}$, открывающий регулирующий элемент. Если $U_{вых} > U_{лин}$, то $U_{упр} = 0$ и регулирующий элемент закрыт.

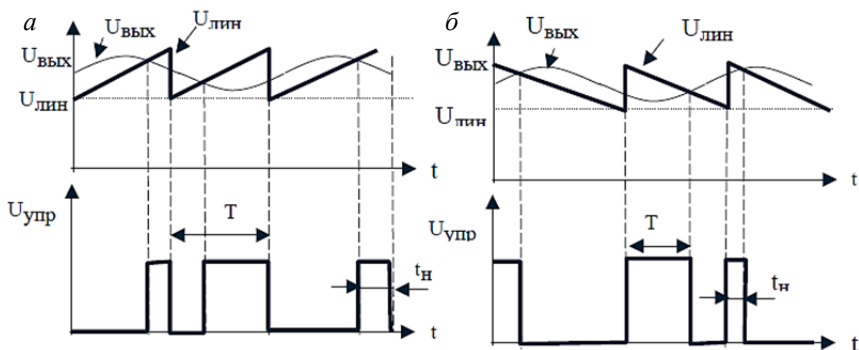


Рис. 3.3. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу ШИМ-модулятора:
a – при линейно-нарастающем вспомогательном напряжении;
б – при линейно-спадающем вспомогательном напряжении

Упрощенная схема ИП (стабилизатора) с релейным управлением регулирующим элементом представлена на рис. 3.4.

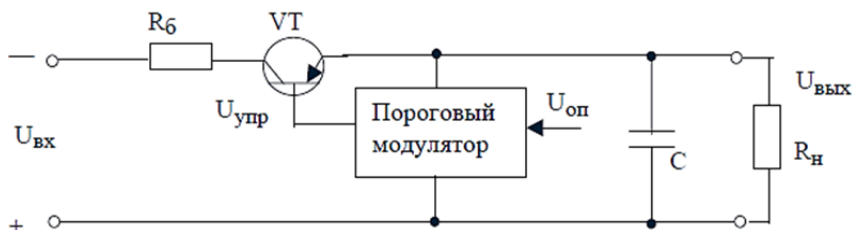


Рис. 3.4. Релейное управление регулирующим элементом

Как и в схеме (рис. 3.1), регулирующий элемент (транзистор VT) открывается управляющим напряжением $U_{упр}$, формируемым модулятором. Различие заключается в способе формирования $U_{упр}$. Для схемы (рис. 3.4) процесс формирования управляющих импульсов поясняет рис. 3.5. Когда транзистор VT открыт, конденсатор C заряжается через токоограничивающий (балластный) резистор $R_б$. Как только напряжение на конденсаторе C достигнет заданного верхнего значения $U_{вых, макс}$, пороговый модулятор запирает регулирующий транзистор и напряжение на конденсаторе C уменьшается вследствие его разряда через нагрузку $R_н$. При уменьшении $U_{вых}$ до величины нижнего порога срабатывания $U_{вых, мин}$ пороговый модулятор

открывает регулирующий транзистор, смещая его эмиттерный переход в прямом направлении напряжением $U_{упр}$. Частота переключения в процессе работы меняется, зависит прежде всего от R_6, R_n, C и $\Delta U = U_{вых.макс} - U_{вых.мин}$.

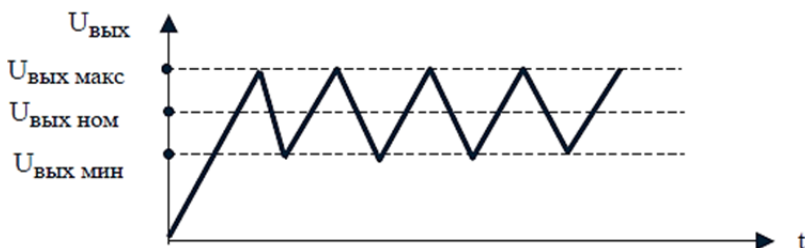


Рис. 3.5. Временная диаграмма выходного напряжения схемы релейного управления регулирующим элементом (см. рис. 3.4)

Емкость конденсатора C и гистерезис схемы U не должны быть очень малыми во избежание высокой частоты переключения регулирующего транзистора VT , так как с увеличением частоты возрастают потери в регулирующем транзисторе.

3.1.2. Импульсные стабилизаторы напряжения постоянного тока. Из рассмотрения принципа действия импульсных ИП следует, что они являются по сути преобразователями (конвертерами) одного постоянного напряжения в другое (или в несколько других напряжений). В самом деле, на входе любого импульсного ИП переменное напряжение питающей сети выпрямляется, его пульсации сглаживаются конденсатором фильтра и только затем осуществляется преобразование этого постоянного напряжения импульсной схемой. В связи с этим рассмотрим более подробно импульсные преобразователи типа DC–DC.

Понижающий стабилизатор. Типовая схема импульсного стабилизатора понижающего типа представлена на рис. 3.6. На вход регулирующего транзистора подается импульсный сигнал от схемы управления. Изменение скважности управляющих импульсов (отношения периода следования импульсов к длительности импульса) происходит автоматически таким образом, чтобы выходное напряжение поддерживалось на заданном уровне с допустимой точностью. Дроссель L и конденсатор C преобразуют однополярные импульсы

переменной скважности, поступающие с коллектора регулирующего транзистора, в напряжение постоянного тока. Диод VD обеспечивает протекание тока в дросселе, когда регулирующий транзистор находится в закрытом состоянии. Работа стабилизатора поясняется временными диаграммами (рис. 3.7). В промежутки времени, когда регулирующий транзистор открыт ($t_0 - t_1$, $t_2 - t_3$, $t_4 - t_5$), на вход фильтра LC-типа прикладывается напряжение питания. Диод VD при этом закрыт. Ток в дросселе в эти промежутки времени I_L возрастает по линейному закону, достигая своего максимального значения к моменту выключения транзистора. В промежутки времени, когда регулирующий транзистор закрыт ($t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$, $t_5 - t_6$), энергия, накопленная в элементах фильтра, передается в нагрузку. Ток дросселя I_L протекает через открытый диод VD.

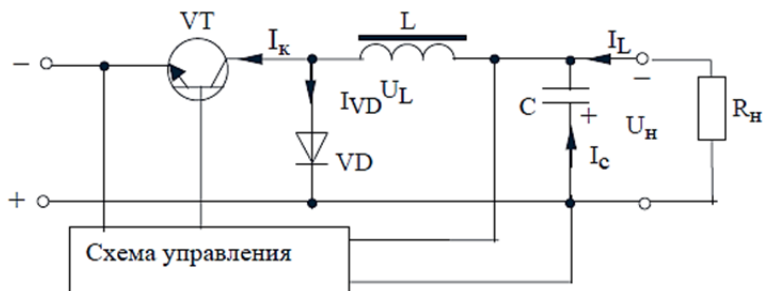


Рис. 3.6. Понижающий импульсный стабилизатор

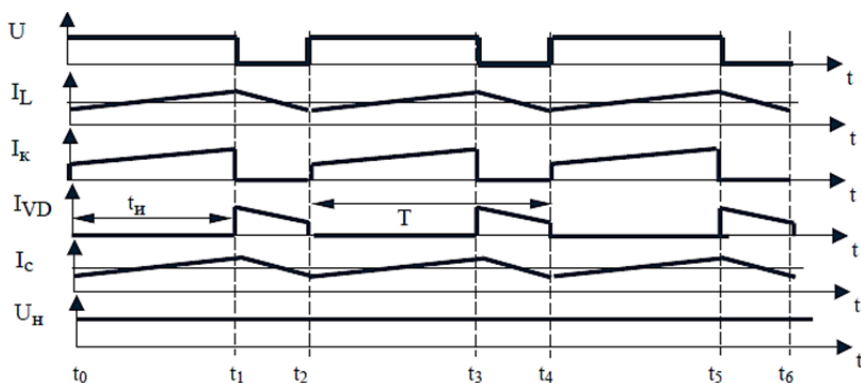


Рис. 3.7. Временные диаграммы работы понижающего стабилизатора

Уровень пульсаций выходного напряжения во многом определяется индуктивностью дросселя и емкостью конденсатора фильтра. При уменьшении индуктивности дросселя фильтра в нем увеличиваются пульсации тока. При весьма малой индуктивности L в схеме стабилизатора может наступить режим прерывистого тока в дросселе, при котором ухудшается нагрузочная характеристика стабилизатора.

Повышающий стабилизатор. Рассмотрим схему импульсного стабилизатора с регулирующим транзистором, подключенным параллельно нагрузке (рис. 3.8). В рассматриваемом стабилизаторе регулирующий транзистор отделен от нагрузки диодом. При открывании транзистора через дроссель протекает коллекторный ток VT , который увеличивается по линейному закону, достигая своего максимального значения к моменту закрытия транзистора. Дроссель при этом запасает электромагнитную энергию, диод VD закрыт (на его катод положительный потенциал).

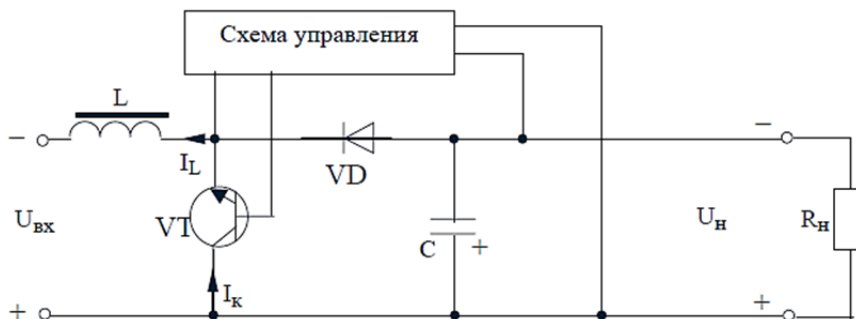


Рис. 3.8. Повышающий стабилизатор

После закрытия регулирующего транзистора электромагнитная энергия, накопленная в дросселе на предыдущем интервале времени, через открывшийся диод передается в нагрузку и частично сообщается конденсатору. По сравнению с ранее рассмотренной схемой (рис. 3.6) в параллельном стабилизаторе выходное напряжение может превышать входное. Зависимость выходного напряжения от относительной длительности открытого состояния регулирующего транзистора представлена на рис. 3.9. Здесь представлены три зависимости отношения выходного напряжения к входному $U_n / U_{вх}$ от коэффициента заполнения управляющих импульсов $\gamma = t_n / T$, при различных

значениях независимого параметра $\rho = r_L / (r_L + R_H)$, где r_L – сопротивление дросселя фильтра, R_H – сопротивление нагрузки.

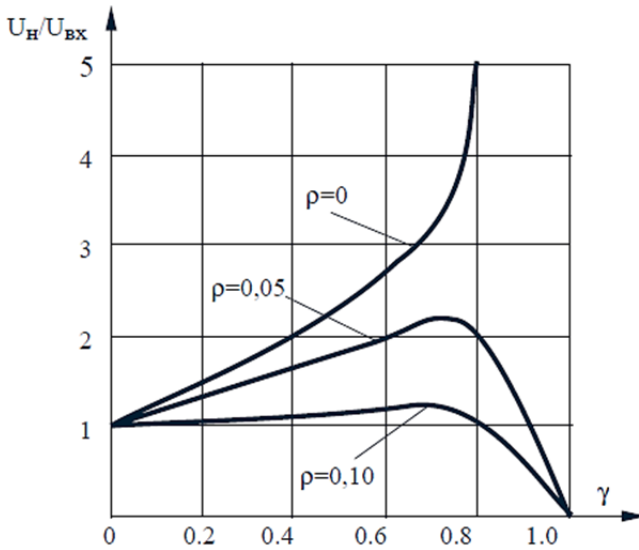


Рис. 3.9. Регулировочные характеристики стабилизатора (см. рис. 3.8)

Инвертирующий стабилизатор. На рис. 3.10 представлена схема стабилизатора, который изменяет полярность входного напряжения. При этом, как в схеме (рис. 3.8), выходное напряжение может превысить по величине напряжение на входе стабилизатора.

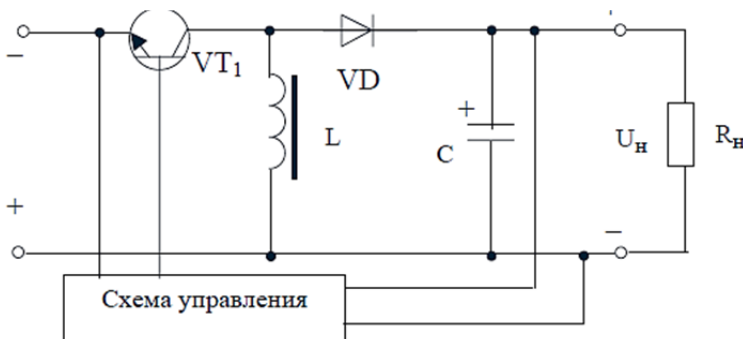


Рис. 3.10. Инвертирующий стабилизатор

При открытом состоянии регулирующего транзистора дроссель накапливает электромагнитную энергию. Диод VD при этом закрыт, нагрузка вместе с конденсатором фильтра отключена от источника питания. Переключение регулирующего транзистора в закрытое состояние сопровождается открыванием диода VD и переходом энергии, накопленной в дросселе, в конденсатор фильтра C и нагрузку. Полярность выходного напряжения при этом оказывается противоположной полярности входного напряжения.

3.1.3. Применение интегральных микросхем (ИМС) импульсных ИП. Отечественной и зарубежной промышленностью выпускается значительное число типоминималов ИМС, предназначенных для построения импульсных ИП.

Схемотехника и особенности применения отечественных микросхем для источников питания достаточно широко освещены в литературе [1, 2]. Описание особенностей работы импульсных источников питания также можно найти в специальной литературе, например, [3]. Как известно, в импульсных источниках питания входное нестабилизированное напряжение преобразуется в достаточно высокочастотное (более 20 кГц). При этом чтобы получить требуемый уровень стабилизации, необходимо провести регулирование коэффициента заполнения импульсного напряжения и затем осуществить процесс выпрямления, что и обеспечивает стабильное постоянное выходное напряжение источника питания. В понижающих импульсных стабилизаторах значение выходного напряжения ($U_{\text{вых}}$) всегда ниже входного ($U_{\text{вх}}$) и определяется простым выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{t}{T},$$

где t – время открытого состояния выходного ключевого транзистора;

T – период следования импульсов.

Коэффициент полезного действия (КПД) преобразования таких микросхем достаточно высокий – 70–95 %, поскольку их входная цепь «развязана» с выходной по постоянному току.

Как известно, импульсные стабилизаторы напряжения могут работать с использованием как релейного (гистерезисного) способа преобразования, так и путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ)

(с регулированием по напряжению или по току). Более качественные характеристики имеют импульсные стабилизаторы, использующие метод ШИМ. Их рабочая частота, как правило, постоянна, что позволяет оптимизировать параметры индуктивности и емкости выходного фильтра и упрощает решение задачи фильтрации помех. Численные значения пульсаций выходного напряжения таких стабилизаторов значительно меньше, чем релейных. Недостаток ШИМ-стабилизаторов с управлением по напряжению – реакция на скачкообразное изменение тока нагрузки или входного напряжения. Для обеспечения их устойчивости обязательно использование частотной коррекции в цепи отрицательной обратной связи. Более совершенные динамические характеристики по сравнению со стабилизаторами с управлением по напряжению имеют ШИМ-стабилизаторы с управлением по току. Они же обладают и лучшей устойчивостью. В дополнение к цепи отрицательной обратной связи по напряжению их структурная схема включает и быстродействующую цепь обратной связи по току. Как правило, сигнал обратной связи по току поступает от датчика тока выходного ключа, выделяется на токоизмерительном резисторе и суммируется с сигналом обратной связи по напряжению.

В отечественном серийном производстве (ОАО «ИНТЕГРАЛ») выпускается широкий спектр микросхем для понижающих импульсных стабилизаторов с ШИМ-регулированием – IL2576, IL2596, IL1501, IZ1583, IZ1591, IZ1412 и IZ2307.

Микросхемы IL2576, IL2596, IL1501 предназначены для импульсных стабилизаторов напряжения с фиксированным выходным напряжением 3,3; 5,0 и 12 В, а также для стабилизаторов с регулируемым внешним резистивным делителем на напряжение в диапазоне 1,2–37 В. Их выходной ток достигает 3 А. Рабочая частота фиксирована и составляет 52 кГц для IL2576 и 150 кГц для IL2596 и IL1501.

Микросхемы IZ1583, IZ1591, IZ1412, IZ2307 – это регуляторы с управлением по току. Предназначены они для проектирования энергосберегающих импульсных стабилизаторов напряжения с регулируемым выходным внешним резистивным делителем напряжения от 1,2 до 21 В (IZ1583 и IZ1591), от 0,92 до 16 В (IZ1412) и от 0,925 до 20 В (IZ2307). Значение выходного тока достигает величины до 3 А (IZ1583 и IZ1591) и 2 А (IZ2307 и IZ1412). Рабочая частота этих микросхем фиксирована и составляет 330–385 кГц.

В микросхеме IZ2307 (рис. 3.11), кроме того, предусмотрена возможность синхронного выпрямления – вместо внешнего выпрямляющего диода Шоттки используется внутренний МОП-транзистор, падение напряжения которого во включенном состоянии меньше, чем у открытого диода Шоттки. Пониженное значение опорного напряжения (0,92–0,925 В) у IZ1412, IZ2307 и синхронное выпрямление у IZ2307 позволяют создавать на их основе импульсные стабилизаторы с высоким КПД. Это особенно важно для источников питания с низким выходным напряжением.

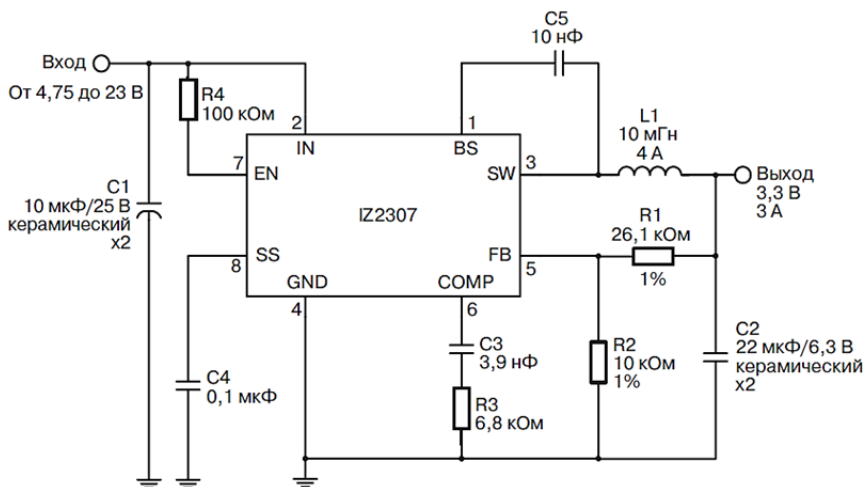


Рис. 3.11. Блок-схема импульсного стабилизатора напряжения с микросхемой IZ2307

На рис. 3.11 представлена блок-схема малогабаритного энергосберегающего импульсного стабилизатора напряжения, построенного на базе микросхемы IZ2307. Как видно из этого рисунка, для построения стабилизатора требуется минимальное количество внешних дискретных элементов. Даже любой радиолюбитель легко может построить это энергосберегающее устройство для использования в бытовой аппаратуре.

Представленные серии микросхем импульсных понижающих стабилизаторов напряжения представляют собой современную элементную базу для экономичных малогабаритных источников питания портативной вычислительной, промышленной и бытовой техники.

Кроме того, многие импульсные интегральные преобразователи напряжения помимо своей основной функции предоставляют работчику одну или несколько из следующих возможностей:

- дистанционное включение и отключение;
- контроль, за входным напряжением с блокировкой и (или) выдачей сигнала в случае ненормативного значения напряжения на входе;
- дистанционное изменение уровня выходного напряжения;
- контроль за входным и выходным токами с адекватной «реакцией» на отклонение их значений от нормативных;
- подключение питаемой схемы к резервному ИП в случае невозможности обеспечения требуемых уровней выходных напряжений.

Более подробно о схемотехнике, особенностях применения и алгоритмах работы рассматриваемых отечественных ИМС смотрите в [4].

3.2. Контрольные вопросы и задания

1. Что такое импульсный источник питания?
2. Чем характеризуется импульсный источник питания?
3. Соберите схему импульсного преобразователя постоянного напряжения (конвертор), приведенную на рис. 3.12.

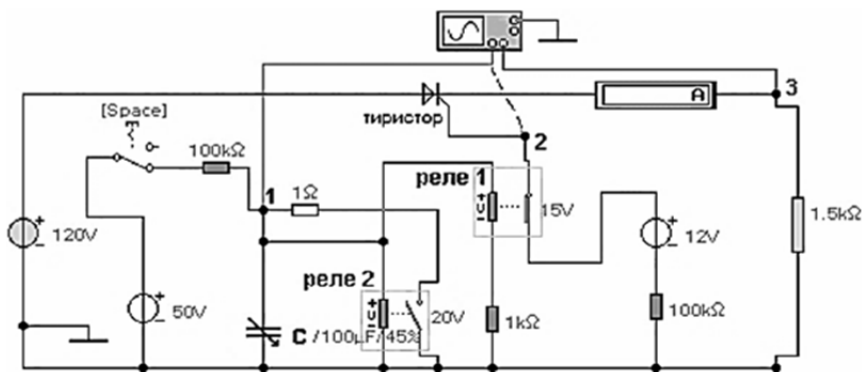


Рис. 3.12. Схема управляемого конвертора

В данной схеме конвертора в качестве ключа используется тиристор, открывающийся при подаче тока управления и запирается при $I_y = 0$. Импульсные преобразователи постоянного напряжения регу-

лируют напряжение на нагрузке U_n путем изменения времени подачи опорного напряжения U_0 на нагрузку R_n .

Принцип действия приведенного преобразователя основан на ключевом режиме работы тиристора, который периодически прерывает цепь между первичным источником напряжения и нагрузкой.

В соответствии с рис. 3.12 путем замыкания реле 1 открываем тиристор, создавая тем самым цепь управления по току от первичного источника питания 12 В. На обмотку реле 1 подается напряжение с конденсатора C , который заряжается через резистор 100 кОм. Реле 1 срабатывает при напряжении 15 В. При повышении напряжения на конденсаторе до 20 В срабатывает реле 2, и конденсатор быстро разряжается через резистор 1 Ом. При этом отключается реле 1 и тиристор запирается. При включении тиристора напряжение на нагрузке равно напряжению источника. При выключении тиристора – напряжение на нагрузке равно нулю. На экране осциллографа мы наблюдаем изменение напряжения на конденсаторе $C = 100$ мкФ; управляющие импульсы и выходное напряжение.

4. С помощью осциллографа проанализируйте напряжение на нагрузке. Осциллограммы зарисуйте. Оцените амплитуду выходного напряжения.

3.3. Рекомендуемая литература

1. Джонс, Х. Электроника – практический курс / Х. Джонс, – М. : Постмаркет, 1999.

2. Крекграфт, Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крекграфт, С. Джерджи. – М. : Техносфера, 2005.

3. Кашкаров, А. П. Устройства импульсного электропитания для альтернативных энергоисточников / А. П. Кашкаров. – М. : «Автор», 2017. – 31 с.

4. Белоус, А. И. Полупроводниковая силовая электроника / А. И. Белоус, С. А. Ефименко, А. С. Турцевич. – М. : Техносфера, 2013. – 216 с.

5. Ефимов, И. П. Источники питания РЭА : учебное пособие. – 2-е изд., испр. / И. П. Ефимов. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – 136 с.

Лабораторная работа № 4

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Цель работы. Ознакомиться с современными интегральными микросхемами отечественного производства для энергоэффективного управления лампами накаливания, галогенными лампами и светодиодными источниками света, изучить их основные технические характеристики, область, способы и особенности применения.

Методические указания. Работа выполняется студентами за четыре часа аудиторных занятий

4.1. Микросхемы управления лампами накаливания

Типичная бытовая лампа накаливания (общего назначения) состоит из следующих частей: нити накала в виде спирали из вольфрамовой проволоки, стеклянного баллона (который откачивается и заполняется инертным газом) и цоколя, который является объединяющей и силовой деталью лампы и имеет контакты для подключения нити накала к электропитанию. Все эти три элемента конструкции могут быть разного размера и различной формы в зависимости от назначения – лампа общего назначения, с внутренним отражателем, витринная, для уличного освещения, для автомобильных фар, для карманного фонаря, фотографическая лампа-вспышка. В бытовых лампах с тремя режимами накаливания имеются две нити накала, которые можно включать по отдельности и вместе, получая разную яркость. Средний срок службы большинства бытовых ламп при номинальном напряжении составляет 750–1000 ч.

Обычно лампы накаливания используются без блоков регулировки. Однако отечественная ИМС ІА1185AD/ІА1185AN (ОАО «ИНТЕГРАЛ») может быть успешно использована для регулировки яркости свечения таких ламп [1]. На рис. 4.1 представлена стандартная схема применения этой микросхемы для регулировки яркости свечения лампы с целью снижения ее энергопотребления. Все что требуется – это заземлить вывод 09 (вход токовой положительной обратной связи (ПОС)).

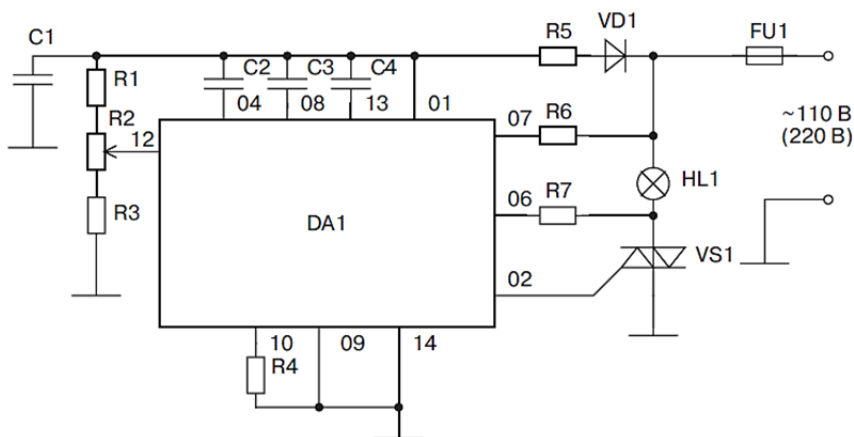


Рис. 4.1. Электрическая схема применения ИМС ILA1185AN/ ILA1185AD для регулировки яркости свечения ламп накаливания

При заземлении вывода 09 образуется разомкнутая петля ПОС, и угол проводимости управляется исключительно с помощью резистора R_2 . Далее, так как ПОС размыкается, больше нет необходимости в резисторах R_8 и R_9 . ИМС определяет момент пересечения уровня 0 В сетевым напряжением. В зависимости от значения резистора R_2 и, следовательно, напряжения на входе ИМС изменяется время запуска симистора, т. е. угол проводимости симистора. Таким образом регулируется яркость свечения лампы накаливания.

4.2. Микросхемы управления газоразрядными источниками света

В газоразрядных лампах электроэнергия преобразуется в свет при прохождении электрического тока через газ или пары металла. Цвет светового излучения зависит от рода газа, его давления и от вида люминофора, нанесенного на внутренние стенки стеклянного баллона лампы. Газоразрядные лампы наполняются инертными газами (неоном, аргоном, криптоном или ксеноном), а также парами ртути или натрия.

Ртутные лампы, широко применяемые в промышленности, состоят из следующих частей: кварцевой трубки дугового разряда, наполненной аргоном и парами ртути; наружной стеклянной колбы

(с внутренним люминофорным покрытием), окружающей трубку дугового разряда, закрывающей ее от воздействия потоков окружающего воздуха и предотвращающей окисление; цоколя, на котором держится вся лампа и имеются электрические контакты для подвода напряжения питания. Размеры и форма этих конструктивных элементов могут быть разными в зависимости от типа лампы – общего назначения (с прозрачной колбой, с люминесцентным покрытием, с исправленной цветностью, рефлекторная, полурефлекторная лампы), ультрафиолетовые, солнечного света и фотохимические лампы.

После того как ртутная лампа включена и в ней установился дуговой разряд, ток разряда через пары ртути сам по себе непрерывно нарастает. Поэтому его приходится ограничивать внешним балластным устройством. Средний срок службы ртутных ламп общего назначения составляет 6 000–12 000 ч.

Люминесцентные лампы состоят из следующих основных деталей: стеклянного баллона, двух цоколей (с выводными контактами) на обоих концах баллона и двух подогревных катодов (электронных эмиттеров) из вольфрамовой нити или стальной трубки. Баллон наполнен парами ртути и инертным газом (аргоном); на внутренние стенки баллона нанесено люминофорное покрытие, преобразующее ультрафиолетовое излучение газового разряда в видимый свет.

Люминесцентные лампы делятся на две группы соответственно типу электродов: с подогревными катодами и с холодными катодами. В лампах с подогревными катодами, которые рассчитываются на большие токи (от 1 до 2 А), как правило, используются спиральные активированные вольфрамовые нити накала. В лампах же с холодными катодами предусматриваются цилиндрические электроды с покрытием из эмиттерных материалов, и они рассчитываются на меньшие токи. Средний срок службы ламп с подогревными катодами зависит от наработки на один пуск: 7 500 ч при 3 ч наработки на один пуск и более 18 000 ч в непрерывном режиме. Для ламп же с холодными катодами срок службы не зависит от числа пусков и достигает 25 000 ч.

Лампы с подогревными катодами по способу их пуска делятся на лампы с предварительным прогревом, быстрого и моментального пуска. Как и все другие газоразрядные приборы, лампы с подогревными катодами нельзя присоединять к источнику питания без балластного устройства, ограничивающего ток.

Лампы с предварительным прогревом нуждаются также в стартере. При пуске такой лампы замыкается стартер, и катоды, соединенные последовательно, подключаются к сети питания, так что по ним проходит ток. После того как катоды разогреются настолько, что могут эмиттировать электроны, стартер автоматически размыкается, и лампа загорается. В благоприятных условиях весь пуск занимает несколько секунд.

В лампах быстрого пуска катоды нагреваются постоянно, а разряд возникает при повышении напряжения. Стартеры не требуются, и время пуска значительно меньше, чем у ламп с предварительным прогревом. В лампах быстрого пуска не требуется прогрева ни катодов, ни стартера. Просто на катод подается повышенное напряжение, которое вызывает эмиссию электронов и зажигание разряда в лампе.

Особого внимания заслуживает проблема снижения энергопотребления электролюминесцентных ламп. В отличие от люминесцентных ламп (в которых свет испускается при возбуждении люминофора ультрафиолетовым излучением газового разряда), в электролюминесцентных лампах, изобретенных в 1936 году, электроэнергия преобразуется непосредственно в свет благодаря применению специальных люминофоров. Лампа представляет собой многослойную конструкцию из слоя люминофора (цинк-сульфидного, активированного медью или свинцом) и двух электропроводящих пластин, одна из которых прозрачна. Устройство электролюминесцентных ламп двух типов показано на рис. 4.2.

Цвет свечения лампы (синий, зеленый, желтый или розовый) зависит от частоты напряжения питания, а яркость – от частоты и напряжения. Электролюминесцентные лампы пока что не отличаются большой световой отдачей.

Все газоразрядные лампы имеют так называемую «падающую» вольт-амперную характеристику. С ростом тока через такую лампу напряжение на ней не растет, а уменьшается. Если ток разряда не ограничивать, он будет лавинообразно расти.

Следовательно, газоразрядные источники света должны включаться с такими устройствами, которые обеспечивают подачу напряжения, достаточного для возникновения разряда, т. е. для зажигания лампы и, одновременно, ограничивают ток разряда на уровне, требуемом для нормальной работы лампы [2, 3].

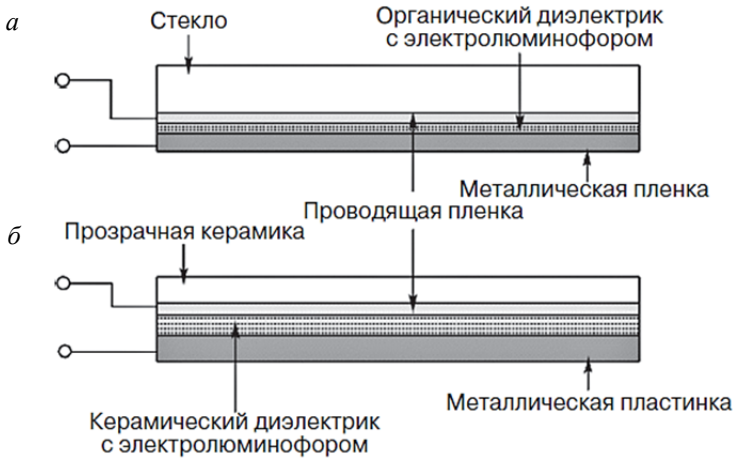


Рис. 4.2. Конструкция электролюминесцентной лампы с использованием органического диэлектрика с электролюминофором (а) и керамического диэлектрика с электролюминофором (б)

Стандартная схема подключения к переменной сети люминесцентной лампы приведена на рис. 4.3.

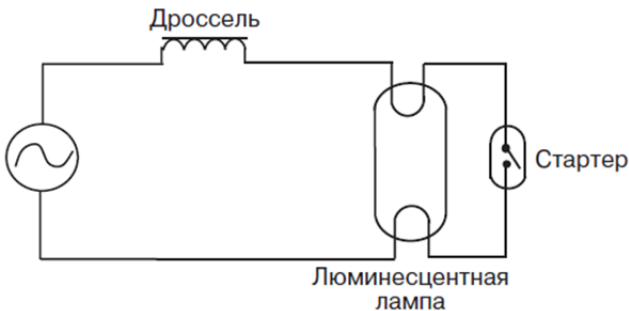


Рис. 4.3. Стандартная схема подключения люминесцентной лампы

Следует отметить недостатки стандартной схемы:

- большие габариты и масса дросселя;
- наличие электромеханического элемента – стартера;
- низкий КПД конструкции из-за резистивных потерь энергии в дросселе;

- схема чувствительна к снижению напряжения в сети (при малом может не зажечься);
- мерцание с частотой 100 Гц;
- относительно низкая надежность (срок службы снижается, если лампа при запуске несколько раз моргает).

Однако в силу высокого КПД самой лампы суммарный КПД конструкции оказывается значительно выше, чем, например, у обычной лампы накаливания при одинаковой мощности. Кроме того, схема имеет низкую себестоимость.

С появлением ламп с «холодным» катодом и успехами в развитии полупроводниковой силовой электроники люминесцентная лампа получила второе рождение. На рис. 4.4 приведена структурная схема драйвера люминесцентной лампы с холодным катодом.

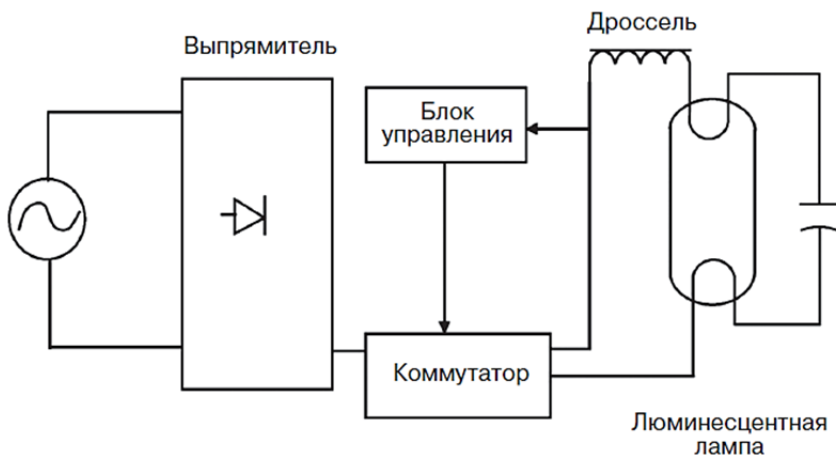


Рис. 4.4. Структурная схема драйвера люминесцентной лампы с холодным катодом

Использование таких драйверов позволило существенно повысить КПД люминесцентных источников света. При этом массогабаритные параметры конструкции и надежность также значительно улучшились. Преимущества электронного драйвера люминесцентной лампы с холодным катодом:

- благодаря высокочастотной коммутации 12–50 кГц исключаются мерцание и стробоскопический эффект;

- значительно уменьшаются размеры дросселя и всего электронного блока, который может разместиться внутри цоколя лампы;
- схема имеет высоковольтный импульс поджига, гарантированно включающий лампу с первого раза, что исключает мерцание при включении.

Области применения люминесцентных ламп с холодным катодом (с электронным балластом):

- освещение;
- планшетные компьютеры;
- сканеры и копировальные аппараты;
- цифровые камеры;
- ноутбуки и плоскочелюстные мониторы;
- PQS (торговые) терминалы;
- подсветка шкал и индикаторов в различных приборах.

Микросхема ІЛА3354N (ОАО «ИНТЕГРАЛ») является типовым представителем семейства интегральных устройств силовой электроники, предназначенных для организации энергосберегающего управления осветительной техникой при применении люминесцентных ламп. Используется эта микросхема для запуска, контроля и выключения высокочастотной генерации электронного балласта для люминесцентных ламп в зависимости от заранее запрограммированных управляющих сигналов.

Технологически микросхема реализована на биполярной технологии с изоляцией *p-n*-переходом.

Фактически ІЛА3354N (напряжение питания 10 В, ток потребления 1,5 мА) реализует функцию контроллера управления блоком питания люминесцентной лампы.

Микросхема организована в виде ряда взаимосвязанных функциональных блоков:

- схема, осуществляющая выбор температурного режима;
- тактовый генератор;
- схема запуска и отключения высокочастотной генерации;
- схема обнаружения ошибки;
- схема определения выбора лампы;
- блок переключения режимов.

На рис. 4.5 представлена электрическая схема устройства контроллера управления блоком питания люминесцентной лампы.

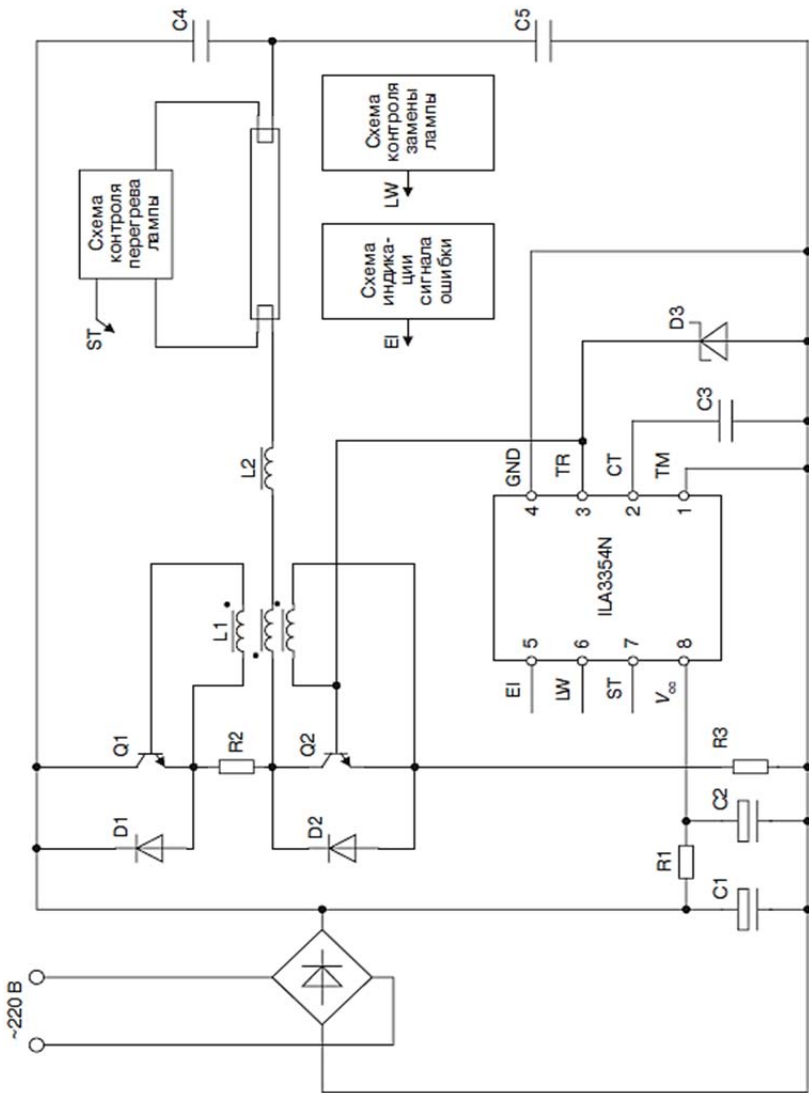


Рис. 4.5. Схема применения ИМС ИЛА3354N для управления блоком питания люминесцентной лампы

Принципиальная электрическая схема обеспечивает выполнение следующих функций:

- защиту от перегрева без дополнительных внешних компонентов;
- запуск алгоритма опроса для определения неисправной люминесцентной лампы;
- ИМС имеет таймер выхода и минимальное количество внешних навесных элементов;
- автоматический запуск при замене ламп.

В промышленных производствах часто используется и другой тип лампы – индукционные лампы. Принцип работы индукционной лампы основан на идее Н. Тесла, выдвинутой им еще в конце XIX столетия. Индукционная лампа работает как обычная флуоресцентная, но при этом не имеет электродов. По сути, она представляет собой трансформатор, в котором роль вторичной обмотки играет колба лампы, заполненная газом. Магнитное поле, создаваемое двумя катушками, порождает электрическое поле в замкнутом витке (колбе лампы). Оно, в свою очередь, порождает электрический ток, который разогревает плазму, излучающую в ультрафиолетовом диапазоне. Под воздействием ультрафиолетового излучения плазмы люминофор излучает в видимом спектре частот, т. е. создает видимый свет.

4.3. Микросхемы драйверов светодиодов

Поскольку светодиодные лампы находят самое разнообразное применение – от систем подсветки и индикаторных панелей до уличных светильников – топология драйвера светодиода должна соответствовать назначению устройства, в котором он используется. Технология драйверов активно развивается в соответствии с новыми областями применения светодиодов и такими требованиями, как улучшение корректировки коэффициента мощности и средств регулировки силы света диода.

Сферы применения светодиодных источников света:

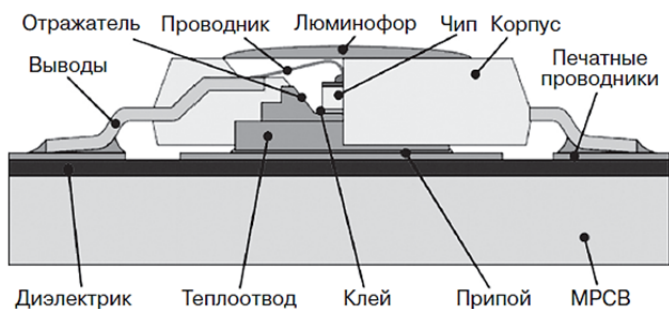
- световые указатели и сигнализация (например, светофоры);
- транспорт (табло и освещение);
- мобильные устройства;
- различные виды подсветки (например, витрины);
- специальные военно-космические применения;
- коммуникационные и бытовые применения;

– автомобили (освещение салона, фары, указатели поворота, освещение приборной доски);

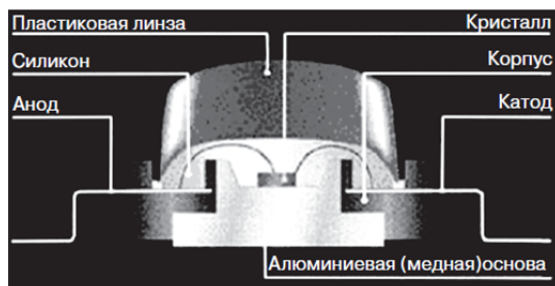
– светодиодные панели (экраны) на улице.

Упрощенно светодиодную лампу можно представить в виде конструкции, состоящей из корпуса с закрепленным в нем излучающим кристаллом, и оптической системы – линзы (рис. 4.6).

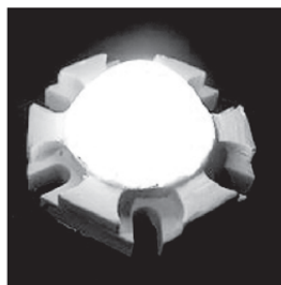
Так, на рис. 4.6, *а* представлен эскиз вертикального сечения типовой конструкции светодиодного устройства, включающего корпусированный кристалл, посаженный в специальный корпус со слоем люминофора на прозрачной крышке, а основание кристалла с отражательным покрытием через теплопроводящий слой посажено на подложку.



а



б



в

Рис. 4.6. Примеры конструкции светодиодных устройств: эскиз вертикального сечения типовой конструкции светодиодного устройства (*а*); конструкция с планарными выводами (*б*); конструкции светодиода с увеличенной площадью теплоотвода (*в*)

Конструкция на рис. 4.6, б с планарными выводами отличается наличием пластиковой линзы в верхней части корпуса светодиода и использованием металлической (медной или алюминиевой) основы. На рис. 4.6, в представлен внешний вид конструкции светодиода с увеличенной площадью теплоотвода.

Основные фирмы-производители кристаллов светодиодов:

- Cree (США);
- Nichia Chemical Corp. (Япония);
- KingBright Electronics (Тайвань);
- Osram Optosemiconductors (Германия);
- Agilent Technologies (США);
- Lumileds Lighting (США);
- Philips (Нидерланды);
- Группа компаний «Оптоган» (Россия).

Имеется достаточно большое количество других фирм, которые занимаются только сборкой светодиодов, не имея при этом собственного производства кристаллов.

Показатели энергоэффективности определяются не только конструкцией самой светодиодной лампы, но и во многом зависят от реализации схемы используемого источника питания. В последнее время большое распространение получили интегральные схемы драйверов (схемы управления) светодиодов. Фактически они являются энергосберегающими источниками тока, обеспечивающими работу светодиода именно в той точке его вольт-амперной характеристики (рис. 4.7), где достигается наибольший КПД.

В большинстве случаев такие драйверы работают по принципу широтно-импульсного регулирования и поддерживают оптимальный режим работы светодиода в широком диапазоне питающих напряжений с КПД преобразования порядка 95 %. К числу основных характеристик драйвера относятся: входное напряжение, выходное напряжение, выходной ток, эффективность преобразования, рабочая температура.

В табл. 4.1 приведен перечень основных отечественных типов ИМС базовой серии драйверов светодиодов, предназначенных для управления различными типами светодиодов и источников света на их основе.

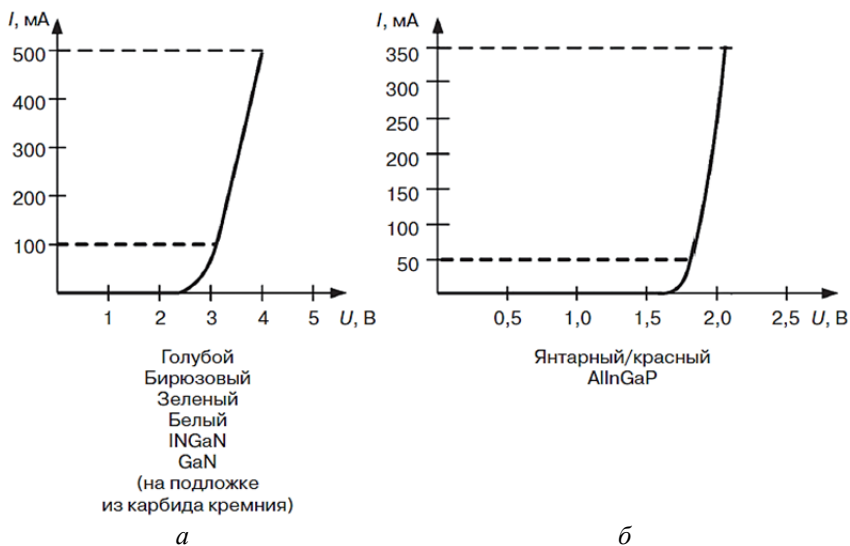


Рис. 4.7. Вольт-амперные характеристики разных типов светодиодов

Таблица 4.1

Интегральные микросхемы драйверов светодиодов (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

ИМС	Напряжение питания U_{cc} , В	Ток потребления, мА	Частота работы, кГц	Ток диодов, мА	Функциональное назначение	Тип корпуса	Технология
IZ1937	2,5–10	1,9	800–1600 (800)	5–20	Драйвер СИД белого цвета	Бескорпусная (усл. SOIC8)	Биполярн.
IZ7150	4–40	≤ 4		1,5А	Мощный драйвер СИД	Бескорпусная	Биполярн.
IZ7150A				0,8А			
IL9910N	8–450	≤ 1 (выкл.)	20–30 (25) 80–120 (100)	До 1 А	Универсальные мощные высоковольтные драйверы СИД (внешний MOSFET)	2101/8-А	БиКДМОП
IL9910D						4303Ю.8А	
IL9910DH						4307.16-А	
IZ9910						Бескорпусная	

Продолжение табл. 4.1

ИМС	Напряжение питания U_{cc} , В	Ток потребления, мА	Частота работы, кГц	Ток диодов, мА	Функциональное назначение	Тип корпуса	Технология
IZ9921	80–264 (перем.) 20–400 (пост.)	$\leq 0,35$	Определяется внутренней линией задержки	20	ИМС высоковольтных драйверов СИД со встроенным MOSFET ключом для управления светодиодами подсветками	Бескорпусная	БиКДМОП
50							
30							
IL9961D	8–450	–	–	До 700	ИМС высоковольтных драйверов СИД (MOSFET внешн.)	4303Ю.8-А	БиКДМОП
IL9961DH						4307.16-А	
IZ9961						Бескорпусная	
IZ9922A	80–264 (перем.) 20–400 (пост.)	–	–	50	ИМС высоковольтных драйверов СИД со встроенным MOSFET ключом, и стабилизацией по среднему значению тока (точность $\pm 3\%$)	Бескорпусная	БиКДМОП

ИМС	Напряжение питания U_{cc} , В	Ток потребления, мА	Частота работы, кГц	Ток диодов, мА	Функциональное назначение	Тип корпуса	Технология
IL9967D IZ9967	8–60	–	Определяется внутренней линией задержки	750	ИМС высоковольтных драйверов СИД со встроенным MOSFET	4303Ю.8-А Бескорпусная	БиКДМОП
TKL201	85–265 (перем.)	≤ 6 (рабочий режим) ≤ 1 (запуск)	60–74 (67)	Вых. мощность до 100 Вт	–	4303Ю.8-А	БиКДМОП

Действительно, спектр используемых напряжений питания U_{cc} этих микросхем лежит в диапазоне минимальных значений от 2,5–10 В до 20–400 В при частотах работы от 20–30 кГц до 0,8–1,6 МГц. Собственные максимальные токи потребления микросхем лежат в диапазоне от 0,1 мА (в состоянии «выключено») до 0,35 мА, выходные токи светодиодов – от 5 мА до 1,5 А.

Если у большинства перечисленных в табл. 4.1 микросхем имеются зарубежные функциональные аналоги, то у ряда оригинальных микросхем присутствуют дополнительные функциональные возможности, существенно упрощающие их использование в составе законченных блоков и узлов высокоэффективных энергосберегающих светодиодных источников [1].

Для аппаратуры с батарейным питанием широко применяют ИМС драйверов светодиодов на основе повышающего преобразования, т. е. применяют повышающий импульсный стабилизатор. На рис. 4.8 представлена функциональная схема микросхемы повышающего стабилизатора IZ1937 (драйвера для трех белых светодиодов, питающегося от литий-ионной батареи), предназначенного для управления светодиодами белого цвета, а на рис. 4.9 – типовая схема ее применения в составе устройства светодиодной подсветки.

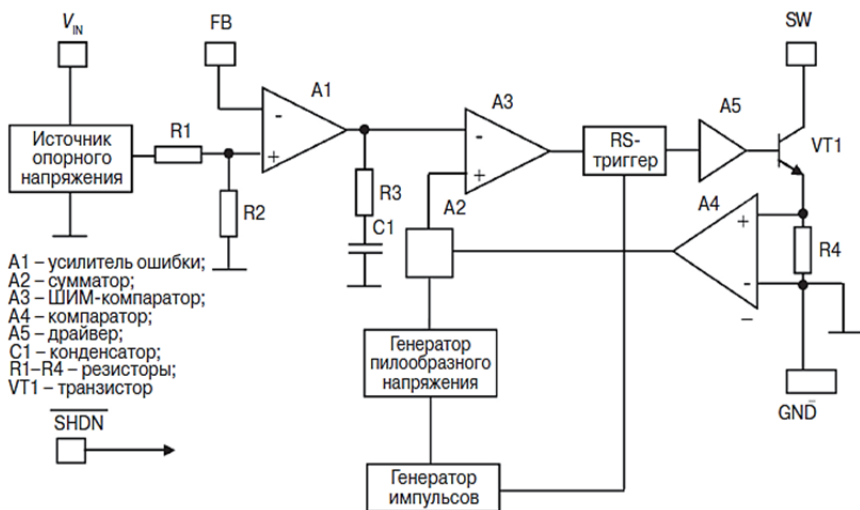


Рис. 4.8. Функциональная схема микросхемы IZ1937

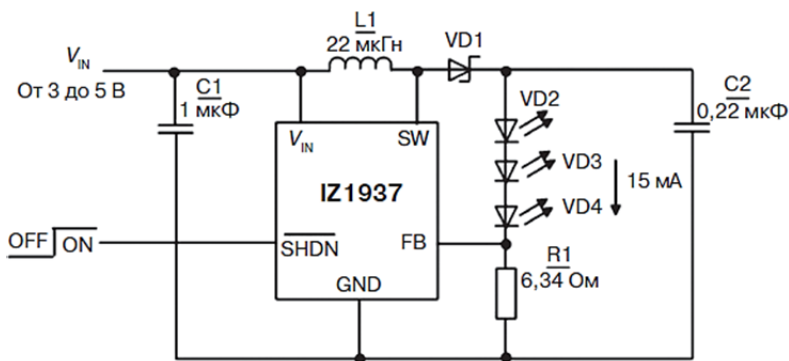


Рис. 4.9. Типовая схема применения микросхемы IZ1937:
VD1 – диод Шоттки; VD2–VD4 – светодиоды

Вход V_{IN} повышающего импульсного стабилизатора для управления светодиодами белого цвета подключается к аккумулятору. С течением времени любая батарея или аккумулятор разряжается. Напряжение на выводе FB (FlyBack) стабилизатора всегда постоянно, что обеспечивается использованием встроенного широтно-импульсного модулятора, и составляет порядка 100 мВ. Следовательно,

стабилизируется и величина тока, протекающего через светодиоды LED1, LED2, LED3. Частота работы стабилизатора составляет 1,2 МГц. Численное значение тока через светодиоды задается номиналом резистора R_1 (от 5 мА при $R_1 = 19,1$ Ом до 20 мА при $R_1 = 4,75$ Ом).

Микросхема IL9910 N/D/DH является эффективным по стоимости вариантом высоковольтного бестрансформаторного источника тока для мощных светодиодов и светодиодных цепочек с выходным током от нескольких мА до более 1 А.

По функциональному назначению и составу параметров микросхема IL9910 является аналогом микросхемы HV9910 ф. Supertex. Конструктивно микросхема IL9910 выпускается в пластмассовом восьмивыводном DIP-корпусе MS-001BA (индекс N), восьмивыводном SO-корпусе MS-012AA (индекс D) и шестнадцативыводном SO-корпусе MS-012AC (индекс DH), в бескорпусном исполнении – IZ9910.

Основные характеристики микросхемы IL9910:

- входное напряжение на входе VIN от плюс 8 до плюс 450 В;
- ток потребления в выключенном режиме не более 1 мА;
- величина тока в светодиодной цепочке задается от нескольких миллиампер до более 1 А;
- управление яркостью свечения от одного до сотен светодиодов, включенных последовательно или последовательно-параллельно;
- возможность ШИМ-диммирования;
- возможность линейного диммирования;
- возможность использования микросхемы в качестве источника стабилизированного постоянного напряжения величиной 7–8 В и подключения внешней нагрузки к выводу VDD с ограничением по току $I_{DD(ext)}$ не более 1 мА;
- диапазон рабочих температур от минус 40 до плюс 85 °С.

На рис. 4.10 приведена типовая схема применения IL9910.

ИМС IL9910 представляет собой микросхему управления высокоэффективным LED-драйвером, позволяющим работать со светодиодными панелями и цепочками светодиодов с напряжением питания от 8 до 450 В постоянного тока. Микросхема управляет внешним MOSFET-транзистором с фиксированной частотой до 300 кГц либо с фиксированным временем отключения не менее 3,4 мкс. Данная частота или время отключения могут быть заданы при помощи внешнего резистора, подключаемого к выводу R_{osc} . Цепочки свето-

диодов управляются постоянным током, что обеспечивает стабильную яркость свечения светодиодов и высокую надежность устройства. Выходной ток цепочки светодиодов может задаваться в диапазоне от нескольких миллиампер до более одного ампера. Величина данного тока может быть установлена на любое значение от нуля до своего максимального значения при помощи внешнего управляющего напряжения, подаваемого на вход линейного диммирования LD. Микросхема IL9910 также имеет вход низкочастотного ШИМ-диммирования, позволяющего управлять яркостью свечения светодиодов ШИМ-сигналом с коэффициентом заполнения импульсов от 0 до 100 % и частотой до нескольких кГц.

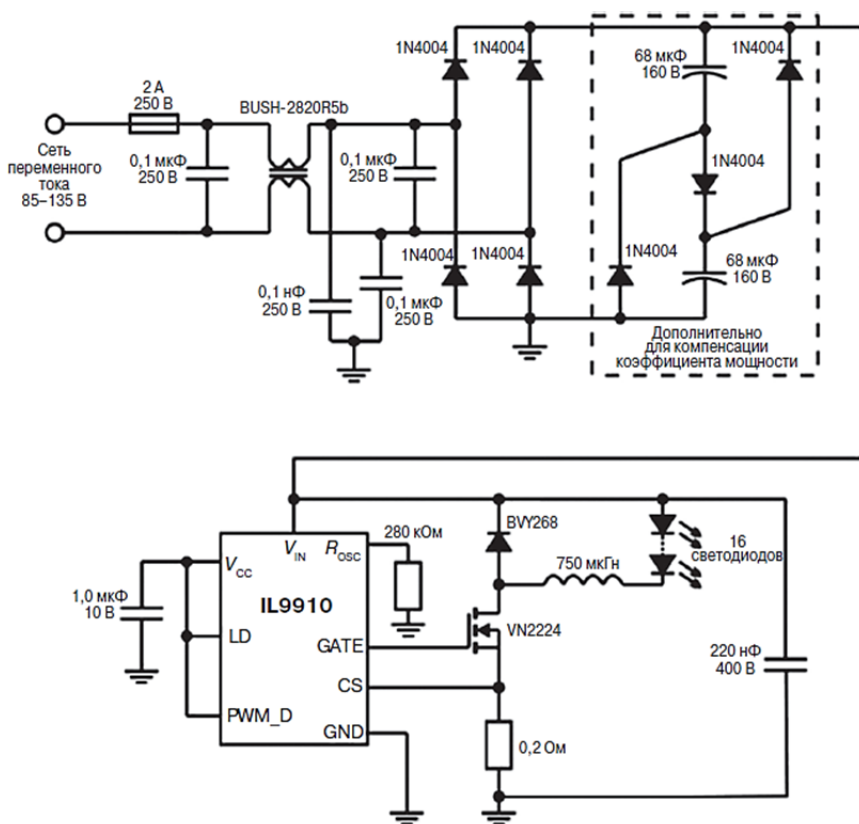


Рис. 4.10. Типовая схема применения микросхемы IL9910

IL9910 применяют в схемах ключевых преобразователей по пиковому току (buck, boost или buck-boost converter) как с изолированным выходом, так и с неизолированным. Данные преобразователи могут работать как в непрерывно включенном, так и в периодически отключаемом режимах. Для осветительного оборудования, имеющего входную мощность менее 25 Вт, дополнительно может применяться схема компенсации коэффициента мощности, фильтрующая пульсации переменного тока. В табл. 4.2 приведены основные электрические параметры микросхем IL9910.

Таблица 4.2

Основные электрические параметры микросхемы IL9910

Обозначение параметра	Наименование параметра	Режим измерения	Норма	
			не менее	не более
U_{DD}	Внутренне регулируемое напряжение питания, В	$U_{IN} = 8 \text{ В}$	7,0	8,0
		$U_{IN} = 450 \text{ В}$	6,95	9,5
U_{VLO}	Пороговое значение внутреннего напряжения питания, В	U_{IN} возрастает от 5 до 8 В	6,20	6,95
			6,00	6,95
$U_{CS(hi)}$	Пороговое напряжение внутреннего компаратора, мВ	$U_{IN} = 8 \text{ В}$	225	275
			225	275
f_{OSC}	Частота внутреннего генератора, кГц	$U_{IN} = 8 \text{ В}$	20	30
			19	36
		$U_{IN} = 8 \text{ В}$	80	120
			75	125
I_{INsd}	Ток потребления в выключенном режиме, мА	Выход PWM_D подключен к GND, $U_{IN} = 8 \text{ В}$	–	1,0
			–	0,9
$U_{GATE(hi)}$	Выходное напряжение высокого уровня, В	Выход PWM_D подключен к \bar{V}_{DD} , $U_{IN} = 8 \text{ В}$, $U_{IN} = 450 \text{ В}$	$U_{DD}-0,3$	–
$U_{GATE(lo)}$	Выходное напряжение низкого уровня, В	Выход PWM_D подключен к GND, $U_{IN} = 8 \text{ В}$, $U_{IN} = 450 \text{ В}$	–	0,3
			–	0,36
t_{DELAY}	Время задержки переключения выхода GATE при изменении сигнала на CS, нс	$U_{IN} = 12 \text{ В}$	–	300
T_{BLANK}	Интервал запирающего тока компаратора, нс	$U_{IN} = 12 \text{ В}$	150	280

Микросхема IL9910 может управлять до сотен высоко ярких светодиодов или совокупностью цепочек высокоярких светодиодов. Светодиодные матрицы (панели) могут состоять из соединенных последовательно или последовательно-параллельно светодиодов.

Область применения микросхемы IL9910:

- DC/DC или AC/DC LED-драйверы;
- LED-драйверы для подсветки светодиодных RGB панелей;
- подсветка ЖК-панелей;
- в универсальных источниках постоянного тока;
- декоративная светодиодная иллюминация;
- автомобильная электроника.

Микросхемы IZ9921, IZ9922, IZ9923 являются высоковольтными LED-драйверами со встроенным MOSFET-ключом, предназначенными для управления светодиодами в маломощных осветительных приборах и аппаратуре, а также светодиодными декоративными подсветками. Данные микросхемы обеспечивают эффективное управление светодиодами от источника постоянного напряжения до 400 В.

По функциональному назначению и составу параметров микросхемы IZ9921/22/23 являются аналогами микросхем HV9921/22/23 ф. Supertex.

На рис. 4.11 представлена рекомендуемая схема применения IZ9921/22/23.

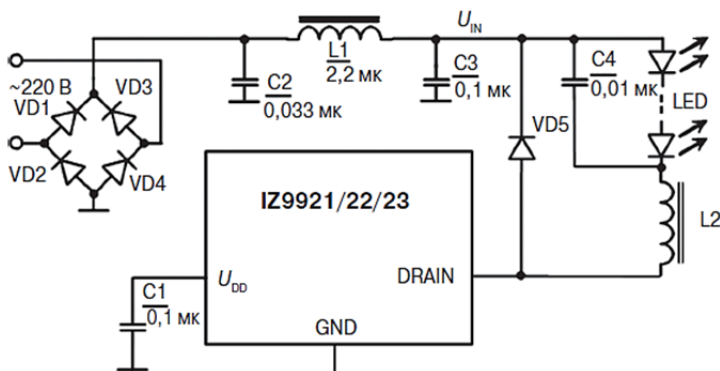


Рис. 4.10. Рекомендуемая схема применения микросхем IZ9921/22/23: LED1 – LEDN – светодиоды с номинальным прямым током: 20 мА при применении микросхемы IZ9921; 50 мА при применении микросхемы IZ9922; 30 мА при применении микросхемы IZ9923; VD1–VD5 – высоковольтные диоды с пробивным напряжением не менее 500 В и током при прямом смещении 1 А

Основные характеристики микросхем IZ9921/22/23:

– постоянная величина тока в светодиодной цепи: IZ9921 – 20 мА; IZ9922 – 50 мА; IZ9923 – 30 мА;

– работа от сети переменного тока с напряжением 85–264 В или от источника постоянного напряжения величиной 20–400 В;

– сопротивление открытого ключа не более 210 Ом при температуре среды 25 °С;

– пробивное напряжение закрытого ключа не менее 500 В при температуре среды 25 °С.

– диапазон рабочих температур от минус 40 до плюс 85 °С.

В табл. 4.3 приведены предельно допустимый и предельный электрические режимы эксплуатации микросхем IZ9921/22/23.

В табл. 4.4 приведены электрические параметры микросхем IZ9921/22/23.

Таблица 4.3

Предельно допустимый и предельный электрические режимы эксплуатации микросхем IZ9921/22/23

Обозначение параметра	Наименование параметра	Предельно допустимый режим		Предельный режим	
		не менее	не более	не менее	не более
U_{IN}	Входное напряжение, В	20	400	–0,3	420
U_{IN}	Напряжение питания низковольтной части схемы, В	–	–	–0,3	10
I_{DD}	Ток потребления в цепи питания низковольтной части схемы, мА	–	–	–	5,0

Таблица 4.4

Электрические параметры микросхем IZ9921/22/23

Обозначение параметра	Наименование параметра	Режим измерения	Норма	
			не менее	не более
U_{DDR}	Напряжение питания, формируемое регулятором, В	$U_{IN} = 20 \text{ В}$	5,5	9,0
		$U_{IN} = 50 \text{ В}$	5,0	9,5
U_{UVLO}	Пороговое напряжение питания низковольтной части схемы, В	$U_{DD} = U_{UVLO}$ $I_{DRAIN} = 20 \text{ мА}$	4,0	–
			3,6	

Окончание табл. 4.4

Обозначение параметра	Наименование параметра	Режим измерения	Норма	
			не менее	не более
I_{DD}	Ток потребления в цепи питания низковольтной части схемы, мкА	$U_{DD} = 9,5 \text{ В}$	–	350
		$U_{IN} = 40 \text{ В}$		500
R_{ON}	Сопротивление открытого ключа на выходе DRAIN, Ом для IZ9921 для IZ9922 для IZ9923	$U_{DD} = U_{DDR}$		210
		$I_{DRAIN} = 20 \text{ мА}$ $I_{DRAIN} = 50 \text{ мА}$ $I_{DRAIN} = 30 \text{ мА}$		400
U_{BR}	Пробивное напряжение закрытого ключа на выходе DRAIN, В	$U_{DD} = U_{DDR} + 0,1$	500	–
		$I_{DRAIN} = 1 \text{ мА}$	420	
I_{SAT}	Ток насыщения ключа на выходе DRAIN, мА	$U_{DD} = U_{DDR}$	100	–
		$U_{SAT} = 50 \text{ В}$	70	
I_{TH}	Пороговый ток, мА для IZ9921 для IZ9922 для IZ9923	$U_{DD} = U_{DDR}$ $U_{SAT} = 50 \text{ В}$	20,5	25,5
			52,0	63,0
30,8	38,2			
T_{OFF}	Время выключения ключа на выходе DRAIN, мкс		8,0	13,0
			6,0	15,0
T_{ON}	Минимальное время 85 включения ключа на выходе DRAIN, нс		–	650
		–	900	
T_{BLANK}	Запирающая задержка, нс	200	400	
		100	600	

Микросхемы IZ7150 и IZ7150A. Данные LED-драйверы предназначены для управления мощными светоизлучающими диодами в широком диапазоне питающих напряжений и токов нагрузки с пиковыми значениями до 0,8 А или до 1,5 А. Микросхемы IZ7150 и IZ7150A найдут свое применение в автомобильной промышленности, DC/DC LED формирователях, в системах освещения и индикации.

По функциональному назначению и составу параметров микросхемы IZ7150 и IZ7150A являются аналогами микросхемы АМС7150 ф. ADDtek.

В табл. 4.5 приведены предельные электрические режимы эксплуатации микросхем IZ7150 и IZ7150A

Таблица 4.5

Предельно допустимые электрические режимы эксплуатации
микросхем IZ7150 и IZ7150A

Обозначение параметра	Наименование параметра	Норма	
		не менее	не более
U_{CC}	Напряжение питания, В	-0,3	40
U_{OUT}	Выходное напряжение	-0,3	40
T_J	Температура кристалла, °С	-	150
T_a	Температура окружающей среды, °С	-60	150

В табл. 4.6 приведены электрические параметры микросхем IZ7150 и IZ7150A.

Таблица 4.6

Электрические параметры микросхем IZ7150 и IZ7150A

Обозначение параметра	Наименование параметра	Режим измерения	Норма		
			не менее	не более	
I_{CC}	Ток потребления, мА	$4,0 \text{ В} \leq U_{CC} \leq 40 \text{ В}$	-	4,0	
U_{DP}	Выходное напряжение насыщения, В	IZ7150	$I_{OUT} = 1,0 \text{ А}$	-	1,3
			$I_{OUT} = 1,5 \text{ А}$	-	3,0
		IZ7150A	$I_{OUT} = 0,5 \text{ А}$	-	1,3
			$I_{OUT} = 0,8 \text{ А}$	-	3,0
U_{CS}	Напряжение датчика тока	-	300	360	
T_{DC}	Максимальная скважность цикла, %	$U_{CS} = U_{CC}$	-	85	
I_{CH}	Ток заряда конденсатора, мкА	-	35	-	

Рекомендуемая схема применения микросхем IZ7150 и IZ7150A показана на рис. 4.11.

Функциональные возможности и электрические параметры представленных на рис. 4.9–4.11 и в табл. 4.1 микросхем позволяют создавать широкий спектр энергосберегающих высокоэффективных светодиодных источников освещения для разных типов выпускае-

мых промышленностью светодиодов с применением минимального количества внешних по отношению к микросхемам дискретных элементов (резисторов, диодов, конденсаторов, индуктивностей и транзисторов).

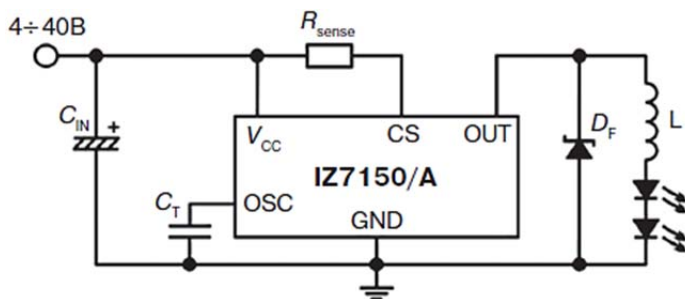


Рис. 4.11. Типовая схема применения микросхемы IL7150N, IL7150D

Микросхема IL7169 (зарубежный аналог AMC7169 фирмы ADDtek) – двухвыводная микросхема защиты светодиодов с низким падением напряжения, рассчитанная на 500 мА тока шунтирования. Особенностью микросхемы является низкий рабочий ток в режиме контроля и высокий ток шунтирования в задающем режиме.

ИМС IL7169 предназначена для параллельного соединения с мощным светодиодом.

Микросхема шунтирует управляющий ток в случае разомкнутой светодиодной цепи, а также шунтирует управляющий ток при обратном включении светодиодов.

Основные характеристики микросхемы IL7169:

- задающее напряжение защиты – 5 В;
- ток шунтирования – 500 мА;
- падение напряжения на шунте – 1 В;
- защита от статического электричества – 8 кВ.

Область применения микросхемы IL7169:

- светодиодное освещение;
- светодиодная подсветка для ЖК телевизоров/мониторов;
- защита мощных светодиодов.

Типовая схема применения ИМС IL7169 приведена на рис. 4.12.

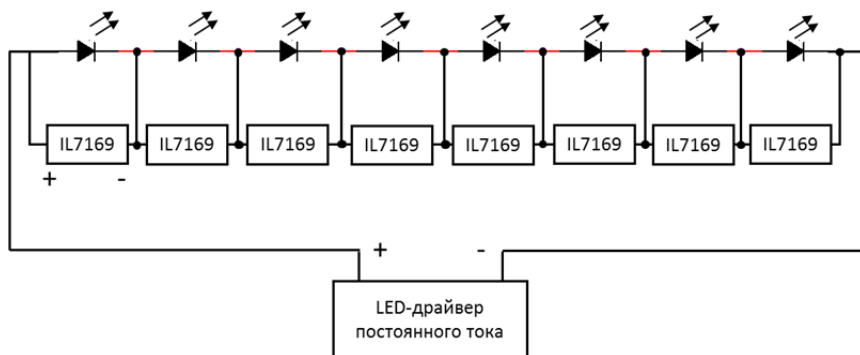


Рис. 4.12. Типовая схема применения ИМС IL7169

Предельно допустимые значения режимов эксплуатации и рекомендуемые рабочие режимы эксплуатации приведены в табл. 4.7 и 4.8 соответственно.

Таблица 4.7

Предельно допустимые значения режимов эксплуатации
ИМС IL7169

Параметр	Значение
Входное напряжение, U_{AC}	40 В
Максимальная рабочая температура перехода, T_J	150°C

Таблица 4.8

Рекомендуемые рабочие режимы эксплуатации ИМС IL7169

Обозначение параметра	Наименование параметра	Норма	
		не менее	не более
U_{AC}	Входное напряжение, В	–	38
I_{BP}	Ток шунта (с соответствующим теплоотводом), мА	–	500
I_R	Обратный ток, мА	–	500
T_A	Рабочий диапазон температуры окружающей среды, °С	-40	85
T_J	Рабочая температура перехода, °С	–	125

Электрические параметры ИМС IL7169 приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Электрические параметры ИМС IL7169

Обозначение параметра	Наименование параметра	Режим измерения	Мин.	Тип.	Макс.
U_{TR}	Задающее напряжение, В	$U_{AC} = (4,65-5,15) В,$ $I_{AC} \leq 50 мА$	4,65	4,9	5,15
U_{DO}	Падение напряжения, В	$I_{AC} = 350 мА$	–	1	1,2
U_{RDO}	Обратное падение напряжения, В	$I_R = 350 мА$		1,1	1,3
I_{MAC}	Ток в режиме контроля, мкА	$U_{AC} = 3,5 В$		100	150
I_{BAC}	Ток переключения, мА	–	–	–	20

Прямое падение напряжения (U_f) у всех светодиодов должно быть менее 4 В, в то время как напряжение включения ИМС IL7169 – 5 В. У всех IL7169 в режиме контроля ток потребления от системы на уровне микроампер (см. рис. 4.13).

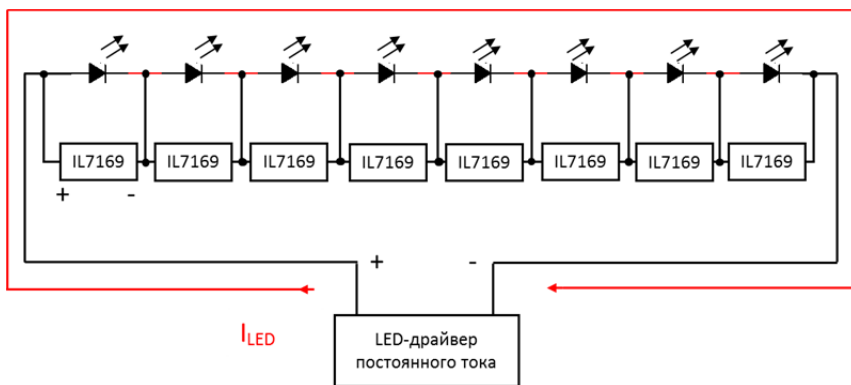


Рис. 4.13. Режим контроля

В случае повреждения светодиодов или цепи может произойти обрыв. Когда это происходит, падение напряжения на смежной ИМС IL7169 начинает возрастать и запускает ее по достижении 5 В.

Падение напряжения на ИМС IL7169 составит примерно 1 В, и ток светодиодной цепи I_{LED} будет шунтироваться на следующий светодиод. Все светодиоды будут исправно работать за исключением поврежденного, который шунтируется (рис. 4.14).

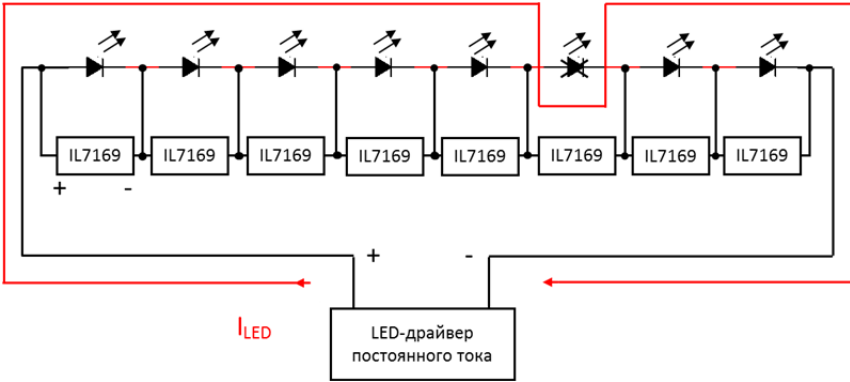


Рис. 4.14. Запускающий режим

Если цепочка светодиодов находится в обратном включении к драйверу, то в ИМС IL7169 включается встроенный диод защиты от обратного включения для шунтирования тока. Таким образом, обратное напряжение на светодиоде уменьшается и предупреждает его повреждение (см. рис. 4.15).

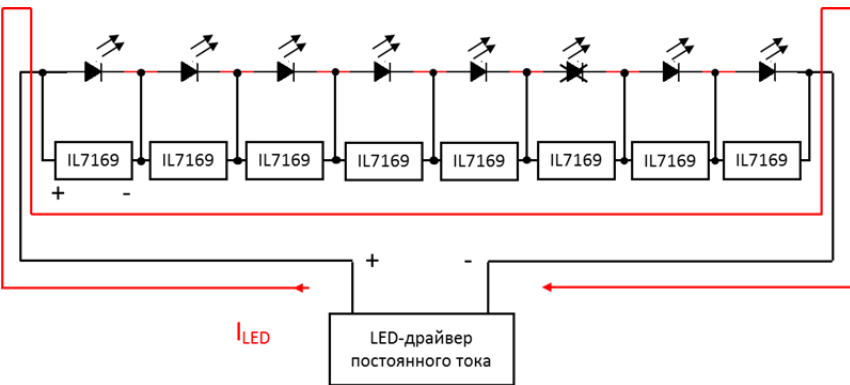


Рис. 4.15. Режим обратного включения

4.4. Контрольные вопросы и задания

1. Назовите назначение электронных драйверов.
2. Каким образом с помощью драйвера лампы накаливания осуществляется управление интенсивности свечения.
3. Назовите функции микросхемы ILA3354N, используемой для организации энергосберегающего управления осветительной техникой при применении люминесцентных ламп.
4. Назовите показатели энергоэффективности светодиодной лампы и ее основные характеристики.
5. Перечислите основные характеристики электронного драйвера светодиодов и источников света на их основе.
6. Назовите особенности применения LED-драйверов для аппаратуры с батарейным питанием.
7. Назовите микросхемы из числа приведенных, предназначенные для управления светодиодами в маломощных осветительных приборах и аппаратуре.
8. Каким образом осуществляется защита светодиодов.
9. Назовите назначение и принцип работы микросхемы IL7169.

4.5. Рекомендуемая литература

1. Белоус, А. И. Полупроводниковая силовая электроника / А. И. Белоус, С. А. Ефименко, А. С. Турцевич. – М. : Техносфера, 2013. – 216 с.
2. Широков, Ю. Драйверы флуоресцентных ламп с холодным катодом // Современная электроника. – 2005. – № 2. – С. 22–24.
3. Безверхий, И. Микросхемы драйверов для электронных балластов люминесцентных ламп (применение, проблемы и решения) // Современная электроника. – 2005. – № 6. – С. 16–19.
4. Широков, Ю. Источники света: вчера, сегодня, завтра // Современная электроника. – 2005. – № 4. – С. 6–10.
5. Давиденко, Д. Высокоэффективные современные светодиоды // Современная электроника. – 2004. – № 10. – С. 36–43.
6. Энергоэффективное электрическое освещение : учебное пособие / С. М. Гвоздев, Д. И. Панфилов, Т. К. Романова [и др.]; под ред. Л. П. Варфоломеева. – М. : Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 с.

7. Ключников, С. В. Светодиоды в освещении : монография / С. В. Ключников. – М. : МИЭЭ, 2014. – 274 с.

8. Вейнерт, Д. Светодиодное освещение : справочник / Д. Вейнерт, Ч. Сполдинг. – Philips, 2010. – 156 с.

Лабораторная работа № 5

СВЕТОДИОДНАЯ ИНДИКАЦИЯ

Цель работы. Ознакомиться с принципами работы и провести экспериментальные исследования светодиодов, столбиковых индикаторов и линейки светодиодов.

Используемое оборудование и средства. Персональный компьютер, программа Multisim.

Методические указания. Работа выполняется студентами за два часа аудиторных занятий.

5.1. Краткие теоретические сведения

Светоизлучающие диоды (СИД) – это полупроводниковые приборы (индикаторы), предназначенные для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.

В основе функционирования светодиодов лежит явление преобразования электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого полностью или частично лежит в видимой области, (диапазон длин волн составляет 0,45–0,68 мкм). Светодиодная структура представляет собой *p-n*-переход, в котором при протекании прямого тока в несколько миллиампер в обеих областях перехода происходит рекомбинация инжектированных электронов и дырок.

Максимальное значение энергии, которое может выделяться при рекомбинации, равно ширине запрещенной зоны данного полупроводника. В полупроводниковых материалах с шириной запрещенной зоны менее 1,8 эВ может возбуждаться излучение с длиной волны более 0,7 мкм, которое лежит за пределами диапазона длин волн видимого света. Поэтому основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления серийных СИД, яв-

ляется фосфид галлия (GaP), твердые растворы GaAsP, GaAlP и карбит кремния (SiC) с шириной запрещенной зоны более 2 эВ. На современном этапе, перспективными технологиями в области СИД считаются [1]:

– InGaN или GaN на подложке из карбида кремния (интересны в плане производства высокоэффективных кристаллов зеленого и голубого свечения, также на их основе производятся светодиоды белого свечения.);

– AlInGaP (позволяет получать светодиоды красного свечения).

Важнейшей характеристикой СИД является яркостная характеристика $B(I_{пр})$, где B – яркость света.

Номинальные токи серийных СИД $I_{пр} = 2\text{--}20$ мА, при прямом и обратном напряжениях 2–3 В ($U_{обр.max} \leq 5$ В).

СИД разных цветов, как и все светоизлучающие приборы в устройствах отображения (индикаторные лампы накаливания, газоразрядные (неоновые) индикаторные лампы), используются для визуального отображения информации. Светодиоды с переменным цветом свечения содержат в корпусе два светоизлучающих $p\text{-}n$ -перехода, один из которых имеет резко выраженный максимум спектральной характеристики в красной полосе, другой – в зеленой. При совместной работе $p\text{-}n$ -переходов цвет излучения светодиода зависит от отношения токов через эти переходы. Они могут служить индикаторами изменения токовых режимов в электронной цепи.

Светодиоды, обладающие рядом преимуществ (малые габариты, низкое напряжение питания, набор различных цветов свечения, большой срок службы), с успехом используются в схемах индикации включения, готовности к работе, наличия напряжения в блоке, аварийной ситуации узла и в других схемах.

В практических целях светодиоды часто объединяют в единый набор из десяти элементов, образуя так называемую линейную шкалу, или линейку независимых светодиодов.

Светодиод так же, как и газоразрядная лампа, управляется током, поэтому схема подключения к цифровой микросхеме практически совпадает со схемой подключения газоразрядной лампы (рис. 5.1).

Расчет токоограничивающего резистора в этой схеме аналогичен расчетам в случае газоразрядного индикатора. Отличие состоит в том, что падение напряжения на СИД лежит в пределах от 1,5 до 3 В. Расчет резисторов R1 и R2 аналогичен расчетам в транзисторных

ключах. Подобные схемы применяются в драйверах светодиодных индикаторов.

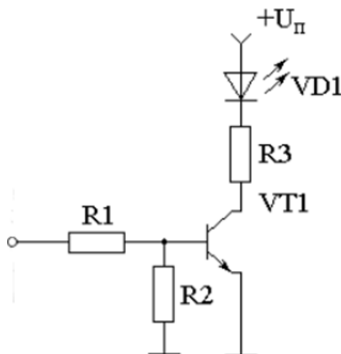


Рис. 5.1. Схема подключения СИД-индикатора к цифровой микросхеме

Учитывая, что выходной ток современных цифровых микросхем превосходит минимальный ток зажигания светодиода, транзисторный ключ для подключения СИД можно не использовать (рис. 5.2). При этом напряжение питания микросхемы должно быть достаточным для падения напряжения на светодиоде и токоограничивающем резисторе.



Рис. 5.2. Схема подключения светодиодного индикатора к цифровой микросхеме с питанием 5 В (а), использование тока единицы (б) для зажигания светодиодного индикатора

В схеме, приведенной на рис. 5.2, а, используется ток нуля цифровой микросхемы. Этот ток в большинстве цифровых схем больше тока единицы. При использовании обычного выходного каскада необходимо, чтобы напряжение питания микросхемы было равно

напряжению, подаваемому на светодиод, т. е. больше 5 В. В большинстве современных микросхем ток единицы превышает минимальный ток зажигания светодиода. Схема с использованием единичного тока цифровой микросхемы приведена на рис. 5.2, б. Здесь для зажигания светодиода на выходе микросхемы следует сформировать единичный потенциал.

В библиотеки программной среды MULTISIM входят светодиоды разных цветов (в том числе двухцветные), 7- и 16-сегментные диодные дисплеи, линейные шкалы (линейки из десяти независимых светодиодов, в том числе со встроенным АЦП) и дисплеи.

Недешифрирующий столбиковый индикатор представляет собой набор из десяти диодов, аналогичный набору светодиодов, но отличается от него по ряду параметров. Во-первых, диоды обладают внутренним сопротивлением, во-вторых, они требуют ток, равный 5 мА, что следует учитывать при проектировании схем. Ток через каждый диод может проходить в обоих направлениях при отсутствии на них прямого падения напряжения в 1,5 В, характерного для светодиодов. Однако каждый диод обладает внутренним сопротивлением 500 Ом и характеризуется пороговым значением тока (5 мА), ниже которого соответствующая черта в приборе не светится. Как сопротивление диодов, так и пороговый ток можно изменить в диалоговом окне прибора. Также в библиотеке среды MULTISIM размещены аналоговые столбиковые индикаторы с одним аналоговым входом. Благодаря встроенным логическим схемам индикаторы преобразуют аналоговый сигнал в десять цифровых сигналов, которые отображаются в уровень столбика на своих дисплеях.

5.2. Контрольные вопросы и задания

1. Назовите принцип действия светодиодов.

2. Соберите схему индикации состояния выхода логического элемента «И-НЕ» (NAND), приведенную на рис. 5.3, установите в диалоговых окнах компонентов их параметры и режимы работы.

Запустите программу моделирования элементов NAND с индикацией его состояния посредством двухцветного светодиода VD1, светодиода оранжевого цвета VD2 и пробников X1, X2 и X3. Замкните ключ Spase. Так как на оба входа логического элемента NAND подана «1» (пробники X1 и X2 светятся), то на его выходе формируется

«0» (X3 – не засвечивается, а светодиоды VD1 и VD2 светятся, так как на их аноды подано напряжение 5 В от источника VCC). При размыкании ключа Space на выходе элемента NAND формируется логическая «1», поэтому VD1 и VD2 и пробник X2 гаснут, а пробник X3 засвечивается. Изменяя сопротивление потенциометра R1, определите с помощью амперметров A1 и A2 токи, протекающие через *p-n*-переходы светодиода VD1, при которых излучается красный свет, оба перехода гаснут и начинает излучаться зеленый свет.

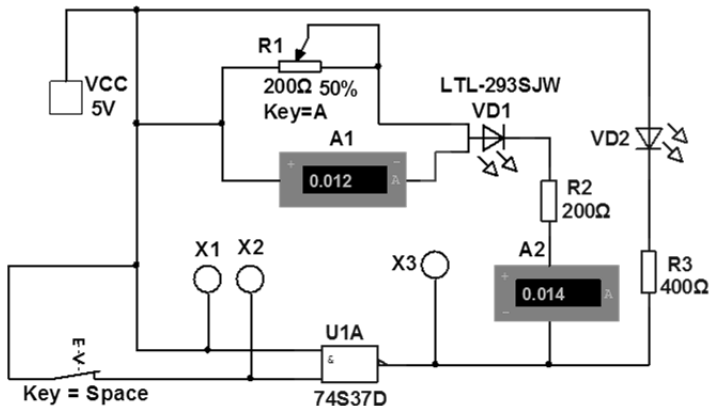


Рис. 5.3. Схема индикации

3. Для исследования работы индикаторов (пробников, дисплея, линеек) соберите схему, представленную на рис. 5.4.

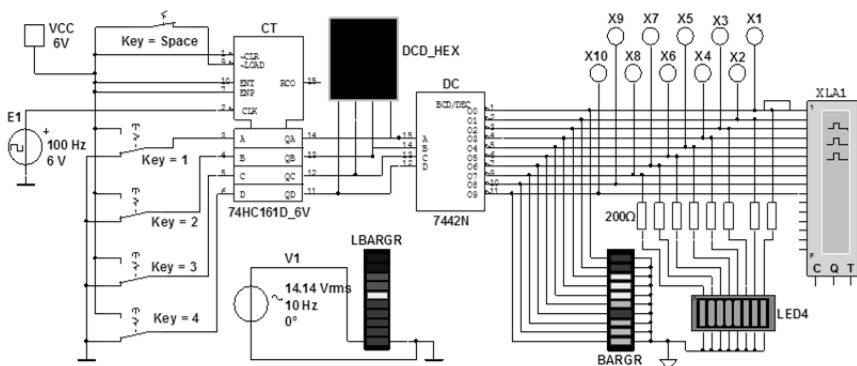


Рис. 5.4. Схема исследования индикаторных устройств

В схему (рис. 5.4) включены пробники X1–X10, 7-сегментный дисплей DCD_HEX, недешифрирующий столбиковый индикатор BARGR, аналоговый столбик LBARGR, линейка из десяти независимых светодиодов LED4, источники питания E1, E2 и VCC, логический анализатор XLA1, переключатели 1–4, счетчик CT, дешифратор DC и другие компоненты.

На рис. 5.4 показано состояние индикаторных устройств после подачи тактового импульса с генератора E1 на вход счетчика CT: разрядные сигналы (код 0110) на выходе счетчика вызвали индикацию цифры 6 на 7-сегментном дисплее DCD_HEX, формирование на выходе дешифратора DC логического нуля только на линии Q6. Поэтому не засвечиваются пробник X7 и седьмые полоски в столбиковом диодном индикаторе BARGR и в светодиодной линейке LED4.

Для демонстрации работы индикаторных устройств в одиночном режиме нужно разомкнуть ключ Spase, набрать с помощью ключей 1–4 любой код от 0000 до 1111 и подать его на счетчик CT.

Аналоговый столбик LBARGR подключен к источнику синусоидального напряжения E2 с амплитудой ЭДС $E_2 = 14,14$ В. При моделировании показание индикатора (перемещение черточек снизу вверх и обратно) изменяется в соответствии с отсчетами синусоидального напряжения. Исходные значения: напряжение 10 В и внутреннее сопротивление 500 Ом аналогового столбика LBARGR – могут быть изменены в его диалоговом окне.

При включении в схему линейки LED4 из восьми независимых светодиодов последовательно с каждым светодиодом были включены резисторы с сопротивлением $K = 200$ Ом, значения которых определены, исходя из параметров светодиодов (на каждом светодиоде падение напряжения равно 1,66 В при номинальном токе 15 мА) и напряжений узлов схемы, куда включены светодиоды линейки.

Временные диаграммы выходных сигналов дешифратора DC можно наблюдать на экране логического анализатора XLA1.

4. Укажите значения параметров (прямое напряжение $U_{пр}$, прямой ток $I_{пр}$, внутреннее сопротивление при напряжении питания 5 В, относящиеся к модели светодиода программной среды MULTISIM.

5. Укажите напряжение срабатывания моделей пробников среды при напряжении питания 5 В.

6. Укажите максимальное число (в шестнадцатеричном коде), которое может отображать 7-сегментный дисплей.

7. Укажите, какую функцию реализует аналоговый столбиковый индикатор.

8. Можно ли включать светодиоды линейки светодиодов LED4 без ограничивающих ток резисторов.

9. Укажите, влияет ли на режим работы электронных схем подключение к ее узлам более пяти пробников.

5.3. Рекомендуемая литература

1. Белоус, А. И. Полупроводниковая силовая электроника / А. И. Белоус, С. А. Ефименко, А. С. Турцевич. – М. : Техносфера, 2013. – 216 с.

2. Марченко, А. Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

3. Микушин, А. В. Цифровые устройства и микропроцессоры / А. В. Микушин, А. М. Сажнев, В. И. Сединин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010.

4. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004.

5. Виноградова, К. А. Оптоэлектроника светодиодов. Лабораторный практикум / К. А. Виноградова, С. Н. Липницкая, В. Е. Бугров. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 86 с.

6. Сайт по подсветке светодиодами, полезные материалы : <http://www.ekontrol.ru/vibration>.

Лабораторная работа № 6

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ

Цель работы. Ознакомиться с принципами работы и провести экспериментальные исследования имитатора фотоэлектрического модуля.

Используемое оборудование и средства. Персональный компьютер, программа Multisim.

Методические указания. Работа выполняется студентами за два часа аудиторных занятий

6.1. Краткие теоретические сведения

Имитаторы фотогальванических модулей часто требуются инженерам-электронщикам для проверки DC/DC преобразователей, инверторов и схем управления точкой максимальной мощности. Использование этих имитаторов позволяет в лабораторных условиях воссоздать необходимые светотехнические характеристики и избежать проблем при подключении реальных фотогальванических модулей.

На рис. 6.1 представлена простая схема имитатора фотогальванического модуля, входным управляющим сигналом которого служит источник постоянного напряжения. В устройстве используется простейшая эквивалентная схема модуля: источник тока, включенный параллельно с диодом. Выходной сигнал источника тока прямо пропорционален освещенности, а характеристики параллельного диода зависят от температуры.

Источник тока на рис. 6.1, обеспечивающий ток короткого замыкания до 2 А, сделан на двух мощных биполярных транзисторах MJ15023 (Q_2 и Q_3), работающих в линейной области. Величина этого тока пропорциональна базовому току транзисторов. Ток короткого замыкания можно регулировать потенциометром R_2 , изменение сопротивления которого управляет коллекторным током транзистора Q_1 и, соответственно, базовыми токами Q_2 и Q_3 .

Фотогальванические характеристики этого имитатора можно регулировать, изменяя ток источника или количество диодов в последовательной цепочке.

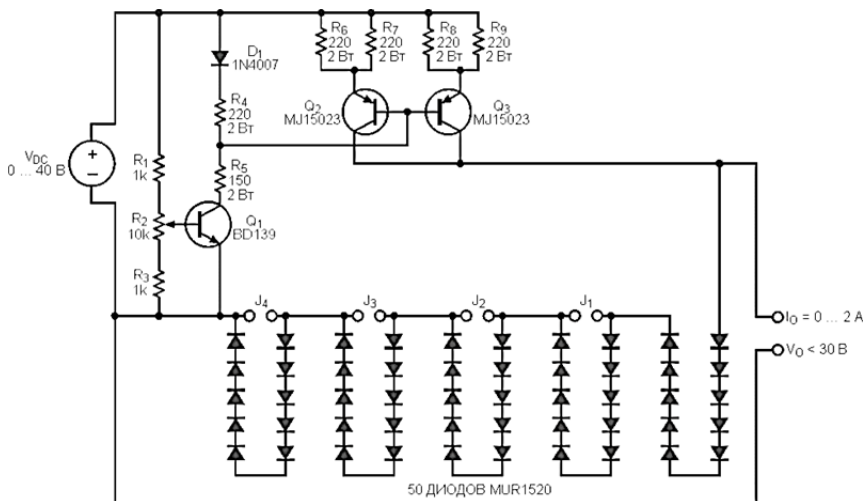
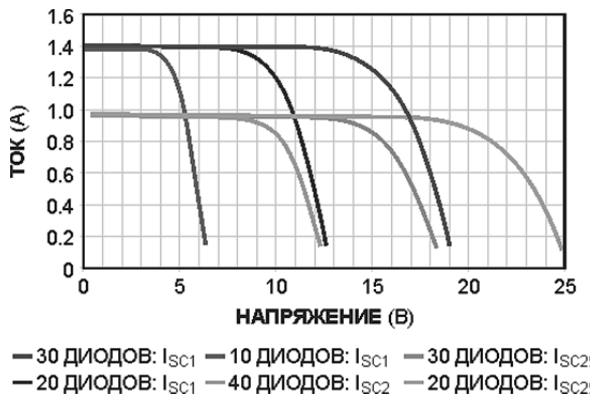


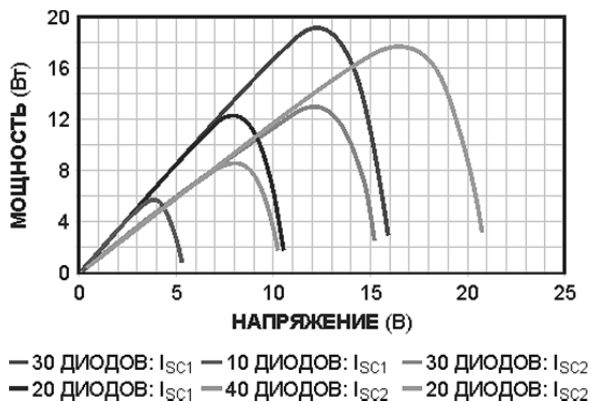
Рис. 6.1. Схема имитатора фотоэлектрического модуля

В схеме 50 диодов MUR1520, соединенные в группы, параллельные и последовательные источнику тока. Эти диоды можно закорачивать группами по 10, что позволяет выбирать количество последовательных диодов, равным 10, 20, 30, 40 или 50. Если точности схемы будет недостаточно, можно разбить диоды в имитаторе на большее число групп и увеличить количество выходных кривых.

На рис. 6.2, *а* и *б* показаны зависимости тока и мощности имитатора фотоэлектрического модуля от входного напряжения при двух значениях тока источника (I_{SC1} и I_{SC2}) и разном количестве диодов. Для получения этих кривых потребовалось использование электронной нагрузки. Ток короткого замыкания искусственного модуля регулируется параметрами выхода источника тока, а подключение или отключение диодов изменяет напряжение холостого хода. Подключив цифровую схему управления имитатором, вы сможете создавать произвольные кривые фотоэлектрических характеристик.



a



б

Рис. 6.2. Зависимости тока (*a*) и мощности (*б*) имитатора фотоэлектрического модуля от входного напряжения при двух значениях тока источника (I_{SC1} и I_{SC2}) и разном количестве диодов

6.2. Контрольные вопросы и задания

1. Что такое фотоэлектрический модуль.
2. Назовите принцип действия фотоэлектрического модуля.
3. В программной среде Multisim соберите схему имитатора фотоэлектрического модуля, приведенную на рис. 6.1, установите в диалоговых окнах компонентов их параметры и режимы работы.

4. Изменяя входное напряжение от 0 до 30 В при двух значениях тока источника ($I_{SC1} = 1$ А, $I_{SC2} = 1,5$ А), получите зависимости тока и мощности имитатора фотоэлектрического модуля от входного напряжения для 10, 20, 25, 30, 40 и 50 последовательных диодов. Для этого поочередно закорачивайте диоды по группам.

5. Зарисуйте зависимости тока и мощности имитатора от входного напряжения. Дайте анализ полученных результатов.

6.3. Рекомендуемая литература

1. Легкий, В. Н. Оптоэлектронные элементы и устройства систем специального назначения : учебник / В. Н. Легкий, Б. В. Галун, О. В. Санков. – Новосибирск : НГТУ, 2011. – 455 с.

2. Бланес, Х. Имитатор фотоэлектрического модуля / Хосе М Бланес, Аусиас Гарригос // Радиолоцман. – 2016 (3). – С. 70–71.

3. Динеш С. Дьюб. Электроника : схемы и анализ / Динеш С. Дьюб, А. Х. Мухаметов. – М. : Техносфера, 2008. – 429 с.

4. Кашкаров, А. П. Устройства на светодиодах, и не только / А. П. Кашкаров. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
----------------	---

Лабораторная работа № 1	
ИЗУЧЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MULTISIM	4
1.1. Краткие теоретические сведения	4
1.1.1. Основные элементы программной среды MULTISIM.....	4
1.1.2. Командные строки инструментальной линейки.....	11
1.1.3. Измерительные приборы, источники питания и устройство визуализации.....	15
1.1.4. Технология сборки схем.....	16
1.2. Контрольные вопросы и задания	20
1.3. Рекомендуемая литература.....	21

Лабораторная работа № 2	
ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ	22
2.1. Краткие теоретические сведения	22
2.1.1. Структура источников питания.....	22
2.1.2. Полупроводниковые выпрямители напряжения.....	24
2.1.3. Стабилизаторы напряжения.....	28
2.2. Контрольные вопросы и задания	32
2.3. Рекомендуемая литература.....	34

Лабораторная работа № 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ.....	35
3.1. Краткие теоретические сведения	35
3.1.1. Управление регулирующим элементом в импульсных ИП	36
3.1.2. Импульсные стабилизаторы напряжения постоянного тока	39
3.1.3. Применение интегральных микросхем (ИМС) импульсных ИП	43
3.2. Контрольные вопросы и задания	46
3.3. Рекомендуемая литература.....	47

Лабораторная работа № 4

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

ОСВЕТИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ	48
4.1. Микросхемы управления лампами накаливания.....	48
4.2. Микросхемы управления газоразрядными источниками света.....	49
4.3. Микросхемы драйверов светодиодов	56
4.4. Контрольные вопросы и задания	78
4.5. Рекомендуемая литература.....	74

Лабораторная работа № 5

СВЕТОДИОДНАЯ ИНДИКАЦИЯ	75
5.1. Краткие теоретические сведения	75
5.2. Контрольные вопросы и задания	78
5.3. Рекомендуемая литература.....	81

Лабораторная работа № 6

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ.....	82
6.1. Краткие теоретические сведения	82
6.2. Контрольные вопросы и задания	84
6.3. Рекомендуемая литература.....	85

Учебное издание

**СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ОСВЕЩЕНИЕМ**

Практикум

для студентов специальности

1-38 01 02 «Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы»

С о с т а в и т е л и :

ПАНТЕЛЕЕВ Константин Владимирович

САМАРИНА Анастасия Вячеславовна

ЖАРИН Анатолий Лаврентьевич

ГУСЕВ Олег Константинович

Редактор *Е. О. Германович*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 14.02.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 4,00. Тираж 100. Заказ 751.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.