Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Схемотехника

Учебно-методическое пособие по самостоятельной работе студентов

Разработчики:
профессор каф. ПрЭ
Михальченко С. Г.
Доцент кафедры ПрЭ
Скворцов В. А.

Томск 2018

Михальченко С.Г., Скворцов В.А

Схемотехника. Учебно-методическое пособие по самостоятельной работе студентов / С.Г. Михальченко, В.А. Скворцов; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 58 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 56.

Настоящее руководство имеет **целью** формирование навыков проектирования ключевых и аналогово-цифровых узлов электронной аппаратуры на базе дискретных элементов, микросхем, операционных усилителей, логических элементов.

В рамках дисциплины реализуются следующие **задачи:**

- изучение работы электронных ключей в дискретном и интегральном исполнении, мультивибраторов, генераторов импульсов специальной формы, цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей;
- приобретение навыков анализа и расчета характеристик электрических цепей;
- исследование простейших физических и математических моделей приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.

© Михальченко С.Г., 2018
© Скворцов В.А., 2018
© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018

Содержание

Содержание ... 3
Введение ... 4
1. Содержание дисциплины ... 6
2. Подготовка к лекционным занятиям ... 7
3. Подготовка к лабораторным работам ... 9
3.1. Лабораторная работа 1. Характеристики импульсных сигналов ... 10
3.2. Лабораторная работа 2. Электронный ключ ... 11
3.3. Лабораторная работа 3. Исследование ждущего мультивибратора и триггера Шмидта 13
3.4. Лабораторная работа 4. Генератор линейно изменяющегося напряжения ... 14
3.5. Описание лабораторного комплекса ... 16
4. Подготовка к практическим занятиям ... 21
4.1. Система моделирования электронных схем ASIMEC ... 22
4.2. Практическая работа 1. Исследование цифроаналоговых преобразователей ... 26
4.3. Практическая работа 2. Исследование автоколебательного блокинг-генератора (Мультивибратора с трансформаторной связью) ... 27
4.4. Практическая работа 3. Исследование ждущего блокинг-генератора (мультивибратора с трансформаторной нагрузкой и положительной обратной связью) ... 32
4.5. Практическая работа 4. Расчет многокаскадных ключевых усилителей на биполярных транзисторах ... 36
4.6. Практическая работа 5. Стабилизаторы постоянного напряжения ... 43
5. Принципы оценки успеваемости обучающихся ... 49
6. Материально-техническое и программное обеспечение дисциплины ... 51
7. Содержание оценочных материалов и методические рекомендации ... 53
Литература ... 56

Введение

Цели дисциплины

формирование навыков проектирования ключевых и аналогово-цифровых узлов электронной аппаратуры на базе дискретных элементов, микросхем, операционных усилителей, логических элементов

Задачи дисциплины

– изучение работы электронных ключей в дискретном и интегральном исполнении, мультивибраторов, генераторов импульсов специальной формы, цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей;

– приобретение навыков анализа и расчета характеристик электрических цепей;

– исследование простейших физических и математических моделей приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.

Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Схемотехника» относится к блоку вариативной части обучения.

Предшествующими дисциплинами, формирующими начальные знания, являются: Введение в электронику, Компоненты электронных схем, Теоретические основы электротехники, Элементы электронной техники, Аналоговая электроника, Микросхемотехника, Микроэлектроника, Основы преобразовательной техники, Теория автоматического управления, Основы технологии электронной компонентной базы и аналогичные им.

Последующими дисциплинами являются: Защита выпускной квалификационной работы, включая подготовку к процедуре защиты и процедуру защиты, Основы технологии электронной компонентной базы, Методы анализа и расчета электронных схем, Энергетическая электроника, Конструкторско-технологическое обеспечение производства изделий микроэлектроники, Микросхемотехника, Моделирование и проектирование микро- и наносистем, Практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности.

Требования к результатам освоения дисциплины

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

– **знать** эквивалентные схемы активных элементов; методы анализа частотных и переходных характеристик; принципы действия и методы расчета усилителей, генераторов, стабилизаторов и преобразователей электрических сигналов; элементную базу аналоговой и цифровой техники, принципы действия и методы расчета элементов аналоговых и цифровых интегральных схем.

– **уметь** проводить анализ цепей при постоянных и синусоидальных воздействиях, а также при воздействии сигналов произвольной формы, импульсных сигналов; анализировать воздействия сигналов на линейные и не линейные цепи,

производить расчет усилителей, генераторов, стабилизаторов и преобразователей электрических сигналов; осуществлять выбор элементной базы аналоговых и цифровых интегральных схем; синтезировать аналоговые и цифровые устройства на основе данных об их функциональном назначении, электрических параметрах и условиях эксплуатации.

– **владеть** методами анализа переходных процессов в линейных и нелинейных цепях; стандартными программными средствами компьютерного моделирования электрических цепей; техникой диагностики электронных схем.

Таблица 1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной деятельности	Всего часов
Аудиторные занятия (всего)	62
Лекции	28
Практические занятия	18
Лабораторные работы	16
Самостоятельная работа (всего)	46
Оформление отчетов по лабораторным работам	2
Подготовка к лабораторным работам	8
Проработка лекционного материала	14
Подготовка к практическим занятиям, семинарам	22
Всего (без экзамена)	108
Подготовка и сдача экзамена	36
Общая трудоемкость, ч	144
Зачетные Единицы	4.0

1. Содержание дисциплины

Таблица 2. Разделы дисциплины и виды занятий

Названия разделов дисциплины	Лекции, ч	Прак. зан., ч	Лаб. раб., ч	Сам. раб., ч
1 Параметры и характеристики импульсных сигналов	4	2	4	6
2 Ключевые устройства, разновидности ключей, переходные процессы в ключевых устройствах	4	2	4	6
3 Основные параметры цифровых интегральных схем и их схемотехника	4	2	0	8
4 Таймер, ЦАП, ЗУ	4	2	0	6
5 Мультивибраторы	4	2	4	6
6 Генераторы линейно нарастающего и линейно падающего напряжения	4	4	4	8
7 Способы регулирования напряжения и тока в устройствах преобразовательной техники	4	4	0	6
Итого за семестр	28	18	16	46
Итого	28	18	16	46

При освоении курса «Схемотехника» преподавателем применяется следующие виды отчетных и проверочных мероприятий:

- Опрос на занятиях,
- Отчет по индивидуальному заданию,
- Отчет по лабораторной работе,
- Отчет по практическому занятию,
- Тест.

Итоговая проверка знаний по курсу проводится в виде **экзамена**.

2. Подготовка к лекционным занятиям

Подготовка к лекционным занятиям состоит в предварительном литературном поиске на тему объявленной лекции, написании и оформлении конспекта лекций, проверка подготовленности состоит в *опросе* преподавателем на занятиях пройденного материала.

Таблица 3. Содержание разделов дисциплин (по лекциям)

Названия разделов	Содержание разделов дисциплины по лекциям	
1 Параметры и характеристики импульсных сигналов	Импульс. Импульсная последовательность. Частота, скважность, относительная длительность. RC и LR цепи в импульсных устройствах. Переходные процессы, апериодические звенья.	4
	Итого	4
2 Ключевые устройства, разновидности ключей, переходные процессы в ключевых устройствах	Ключ с ОЭ. Ключ звезда. Процессы в биполярном транзисторе в режиме ключа. Насыщение транзистора. Многокаскадные усилители класса D и методика их расчетов. Устройства на полупроводниковых приборах с S и N характеристиками. Элементы с отрицательным сопротивлением. Однопереходный транзистор и его применение. Варианты схем на ОПТ, методики расчета.	4
	Итого	4
3 Основные параметры цифровых интегральных схем и их схемотехника	Основные параметры цифровых интегральных схем. Триггер Шмидта и RS-триггер на дискретных элементах; варианты схем управления. Триггер с эммитерной связью. Формирование логических уровней RS- триггер на дискретных элементах. Варианты схем управления. Методика проектирования.	4
	Итого	4
4 Таймер, ЦАП, ЗУ	Интегральный таймер и его применение. Однотактный таймер 1006ВИ1. Синтез сигналов специальной формы на базе ЦАП. Матрицы ЗУ, преобразование кода в напряжение.	4
	Итого	4
5 Мультивибраторы	Заторможенные и автоколебательные мультивибраторы. Ждущий мультивибратор на биполярных транзисторах. Принцип действия, методика расчета Варианты схем автоколебательных	4

	мультивибраторов. Мультивибраторы с трансформаторной связью и блокинг-генераторы. Режимы работы. Варианты схем, методика расчета.	
	Итого	4
6 Генераторы линейно нарастающего и линейно падающего напряжения	Схемотехнические решения, принцип действия и методики расчета.	4
	Итого	4
7 Способы регулирования напряжения и тока в устройствах преобразовательной техники	ШИМ преобразователь. Схемотехнические решения, принцип действия и методики расчета. Источники питания на основе ключевых схем. Формирование алгоритмов управления ключевыми источниками питания.	4
	Итого	4
Итого за семестр		28

Основным учебником по данному лекционному материалу является следующее пособие:
Герасимов В.М., Скворцов В.А. Электронные цепи и микросхемотехника. Часть 2. Схемотехника ключевых устройств формирования и преобразования сигналов: Уч. пособие. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2004 – 209 с. ISBN 5-86889-118-X (Ч.2) ISBN 5-86889-116-3, скачать которое можно по ссылкам с сайта кафедры:
http://ie.tusur.ru/docs/sva/st1.pdf
http://ie.tusur.ru/docs/sva/st2.pdf
http://ie.tusur.ru/docs/sva/st3.pdf

Дополнительная литература приводится в списке литературы в конце данного учебного пособия.

3. Подготовка к лабораторным работам

Подготовка к лабораторным работам состоит в предварительном литературном поиске на тему предстоящей лабораторной работы, изучении лекционного материала, написании и оформлении отчета по лабораторной работе. Проверка выполнения лабораторной работы состоит в *защите подготовленного отчета по лабораторной работе*.

Таблица 4. Наименование лабораторных работ

Названия разделов	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость, ч
1 Параметры и характеристики импульсных сигналов	Генерация импульсной последовательности. Частота, скважность, относительная длительность. Измерение высокочастотных сигналов	4
	Итого	4
2 Ключевые устройства, разновидности ключей, переходные процессы в ключевых устройствах	Ключевые устройства, разновидности ключей, переходные процессы в ключевых устройствах (Электронный ключ).	4
	Итого	4
5 Мультивибраторы	Триггер- формирователь (триггер Шмидта). Ждущий мультивибратор на биполярных транзисторах. Принцип действия, методика расчета, варианты схем.	4
	Итого	4
6 Генераторы линейно нарастающего и линейно падающего напряжения	Генераторы линейно нарастающего напряжения (ГЛИН). RC-цепи в импульсных устройствах (Формирующие цепи)	4
	Итого	4
Итого за семестр		16

Основным учебно-методическим пособием по данному курсу лабораторных работ является следующее:

Топор А.В. Схемотехника. Лабораторный практикум / А.В. Топор, А.В. Бахмет; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. –

55 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 50., скачать которое можно по ссылке с сайта кафедры: http://ie.tusur.ru/docs/new/lab/st/l_st.pdf

Дополнительная литература приводится в списке литературы в конце данного учебного пособия.

Ниже приводится перечень лабораторных работ для подготовки в режиме самостоятельной работы.

3.1. Лабораторная работа 1. Характеристики импульсных сигналов

Целью работы является:

1. Экспериментальное исследование прохождения тестовых импульсных сигналов через цепи преобразования:

   а) разделительную,

   б) дифференцирующую,

   в) интегрирующую.

2. Определение основных зависимостей между параметрами выходных сигналов и параметрами элементов цепей.

3.1.1. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет «Формирующие цепи» выполнен в отдельном корпусе. На лицевой панели лабораторного макета представлены 2 типа формирующих цепей, четыре 4-х позиционных переключателя, а также переключатель *SA*1. Лабораторный макет не требует подключения к источнику питания, для запуска достаточно подать прямоугольные импульсы с генератора импульсных сигналов на вход одной из цепей.

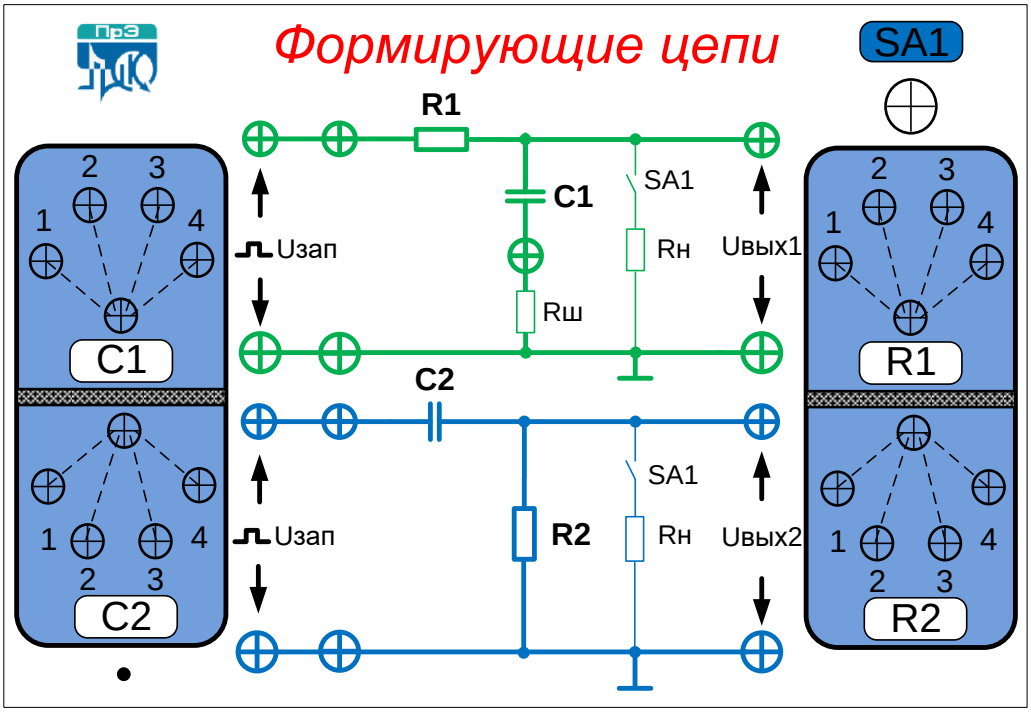


Рис. 1 Схема лицевой панели лабораторного макета

Четыре 4-х позиционных переключателей позволяют подключить необходимые номиналы $C1$, $C2$, $R1$, $R2$ соответственно. С помощью переключателя $SA1$ можно подключать нагрузку $R_н$ к выходу цепи. Положение ВВЕРХ переключателя $SA1$ соответствует режиму ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО.

3.1.2. Контрольные вопросы

Для каких целей используются цепи: разделительная, дифференцирующая, интегрирующая?

При каком условии *RC*-цепь выполняет функции разделительной, дифференцирующей, интегрирующей?

В чем заключается физическая сущность появления погрешности интегрирования?

Объясните, как сопротивление нагрузки $R_н$ влияет на параметры выходного импульса для разделительной, дифференцирующей и интегрирующей цепей? С чем это связано?

3.1.3. Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых цепей, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по каждому пункту программы работы, а также ответы на контрольные вопросы.

3.2. Лабораторная работа 2. Электронный ключ

Целью работы является исследование процессов, протекающих в транзисторном ключе, экспериментальное определение влияния отдельных элементов схемы на параметры выходных импульсов.

Электронным ключом называется устройство, назначение которого заключается в замыкании и размыкании электрических цепей под воздействием управляющих сигналов. В статическом режиме ключевое устройство находится в одном из двух возможных состояний: замкнутом или разомкнутом.

В замкнутом состоянии электронный ключ должен иметь малое сопротивление и, соответственно, малое падение напряжения. В разомкнутом состоянии электронный ключ должен иметь как можно более высокое сопротивление и, соответственно, высокое падение напряжения (близкое к напряжению источника питания Е). Быстродействие его определяется временем перехода из одного состояние в другое, т.е. временем включения и выключения электронного ключа.

В качестве электронного ключа могут применяться различные электронные приборы: диоды, транзисторы, тиристоры и др.

В импульсных и цифровых устройствах находят применение все основные схемы включения биполярных транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК). Наибольшее распространение получила схема с общим эмиттером.

3.2.1. Описание лабораторного макета

Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на Рис. 2.

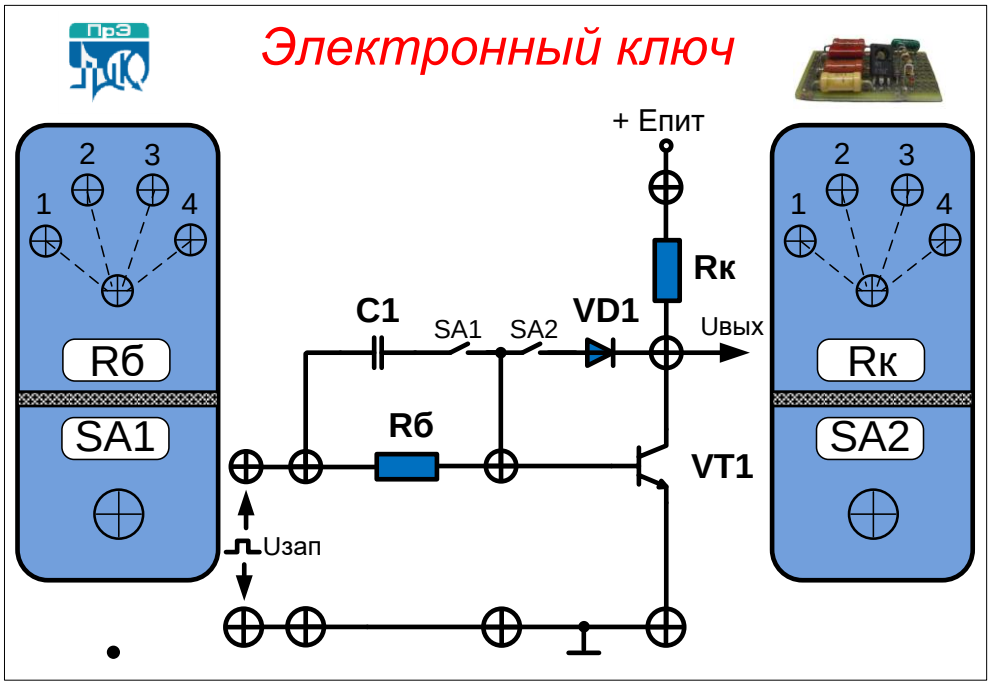


Рис. 2 Схема лицевой панели лабораторного макета

Лабораторный макет «Электронный ключ» выполнен в отдельном корпусе. На лицевой панели лабораторного макета представлена схема электронного ключа, два 4-х позиционных переключателя, а также два переключателя *SA*1 и *SA*2. Для переключателей *SA*1 и *SA*2 положение ВВЕРХ — ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО.

В качестве основного элемента схемы используется биполярный транзистор — КТ815Г (параметры транзистора приведены в справочных таблицах учебного). Питание макета осуществляется от стабилизированного источника 30 В с регулировкой напряжения, встроенного в приборную панель лабораторного стола.

Два 4-х позиционных переключателя позволяют подключить необходимые номиналы базового $R_б$ и коллекторного $R_к$ резисторов. С помощью переключателей *SA*1 и *SA*2 можно подключать форсирующую емкость *C*1 и диод *VD*1 соответственно.

3.2.2. Контрольные вопросы

Чем отличаются параметры биполярного транзистора в ключевом режиме и в активном режиме?

Какие параметры определяют быстродействие транзисторного ключа?

Как связаны между собой степень насыщения транзистора и время фронта *tф*?

Как связаны между собой степень насыщения транзистора и время рассасывания *tрас*?

Объясните влияние ускоряющей емкости на быстродействие транзисторного ключа?

Объясните влияние диода в базо-коллекторной цепи на быстродействие

транзисторного ключа?

3.2.3. Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых цепей, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, временные диаграммы входных и выходных сигналов, выводы по каждому пункту программы работы, а также ответы на контрольные вопросы.

3.3. Лабораторная работа 3. Исследование ждущего мультивибратора и триггера Шмидта

Триггером называется устройство, имеющее два устойчивых состояния и способное под действием управляющих сигналов скачком переходить из одного устойчивого состояния в другое.

В технике связи и управления широко используются триггеры-формирователи (несимметричные триггеры, триггеры Шмидта) — либо в качестве формирователей напряжения прямоугольной формы (меандра) из напряжения непрямоугольной формы, либо в качестве порогового (или сравнивающего) устройства — компараторы напряжения.

Мультивибратор — релаксационный генератор электрических колебаний прямоугольного типа. Мультивибратор является одним из самых распространенных генераторов импульсов прямоугольной формы, представляющий собой двухкаскадный усилитель с глубокой положительной обратной связью. В электронной технике используются самые различные варианты схем мультивибраторов, которые различаются между собой по типу используемых элементов (ламповые, транзисторные, тиристорные, микроэлектронные и так далее), режиму работы (автоколебательный, ждущий), видам связи между усилительными элементами, способам регулировки длительности и частоты генерируемых импульсов.

3.3.1. Описание лабораторного макета

Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на рис. 3. Лабораторный макет «Ждущий мультивибратор и Триггер Шмидта» выполнен в отдельном корпусе. На лицевой панели лабораторного макета представлена обобщенная схема ждущего мультивибратора и триггера Шмидта, три 4-х позиционных переключателя, а также три переключателя *SA*1, *SA*2, *SA*3. Для переключателей *SA*1, *SA*2, *SA*3 положение ВВЕРХ — ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО. Питание макета осуществляется от стабилизированного источника 30 В с регулировкой напряжения, встроенного в приборную панель лабораторного стола.

4-х позиционные переключатели позволяют подключить необходимые номиналы элементов *Rэ*, *C*, *Rt*. С помощью переключателей *SA*1 и *SA*2 можно выбирать одну из приведенных схем, переключатель *SA*3 позволяет подключать нагрузку *Rн* к выходу схемы.

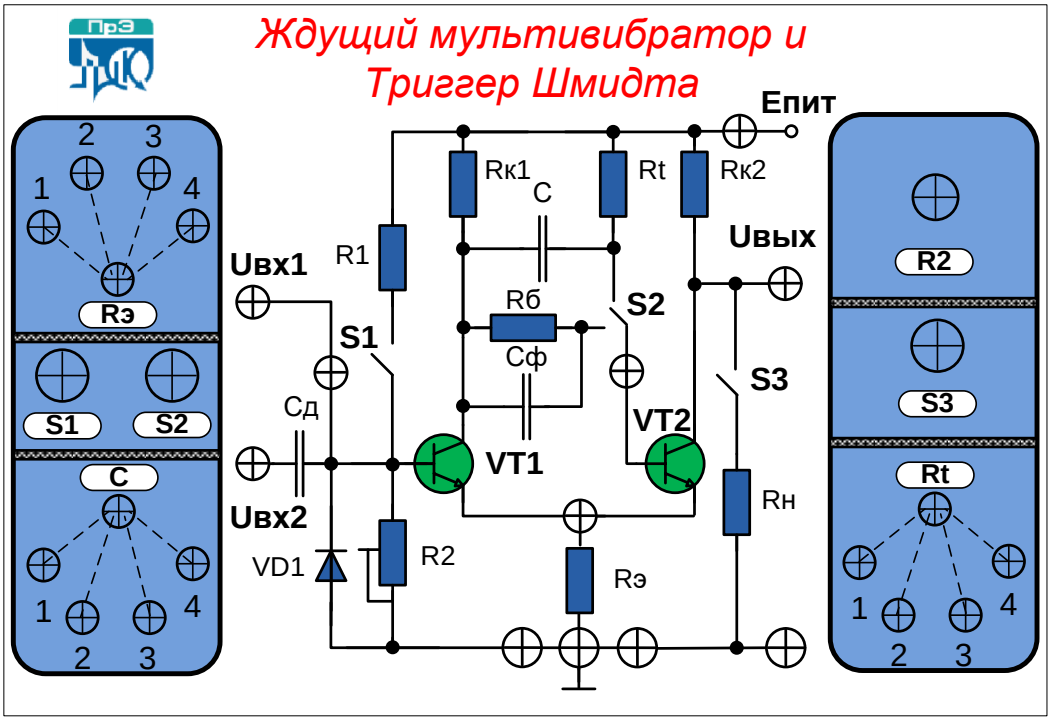


Рис. 3. Схема лицевой панели лабораторного макета

3.3.2. Контрольные вопросы

Чем определяется длительность формируемого импульса для ждущего мультивибратора?

Для чего используется триггер Шмидта?

Как можно изменить порог срабатывания и отпускания триггера Шмидта?

В чем заключается явление гистерезиса?

Чем определяется время восстановления для схемы ждущего мультивибратора?

3.3.3. Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых цепей, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, временные диаграммы входных и выходных сигналов, выводы по каждому пункту программы работы, а также ответы на контрольные вопросы.

3.4. Лабораторная работа 4. Генератор линейно изменяющегося напряжения

Линейно изменяющимся напряжением (ЛИН) называется напряжение, фронт импульсов которого содержит линейно изменяющийся во времени участок.

Основной принцип создания линейно изменяющегося напряжения заключается в заряде (разряде) конденсатора током, неизменным в течение времени рабочего хода.

Целью работы является:

1. Исследование работы простейшего ГЛИН.

• Исследование зависимости выходного напряжения и коэффициента нелинейности пилообразного напряжения $K_н$ от величины зарядного резистора.

• Исследование зависимости выходного напряжения и $K_н$ от периода запускающих импульсов.

• Исследование зависимости длительности обратного хода от величины базового резистора.

2. Исследование ГЛИН со стабилизатором тока.

2. Исследование зависимости выходного напряжения от величины резисторов базового делителя.

3. Исследование зависимости выходного напряжения от величины эмиттерного резистора.

3. Исследование ГЛИН с компенсирующей ЭДС.

4. Исследование зависимости выходного напряжения и $K_н$ от величины зарядного резистора.

5. Исследование зависимости выходного напряжения от величины зарядного конденсатора.

3.4.1. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет выполнен в виде отдельного блока, питание которого осуществляется от внешнего источника питания. Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на Рис. 4.

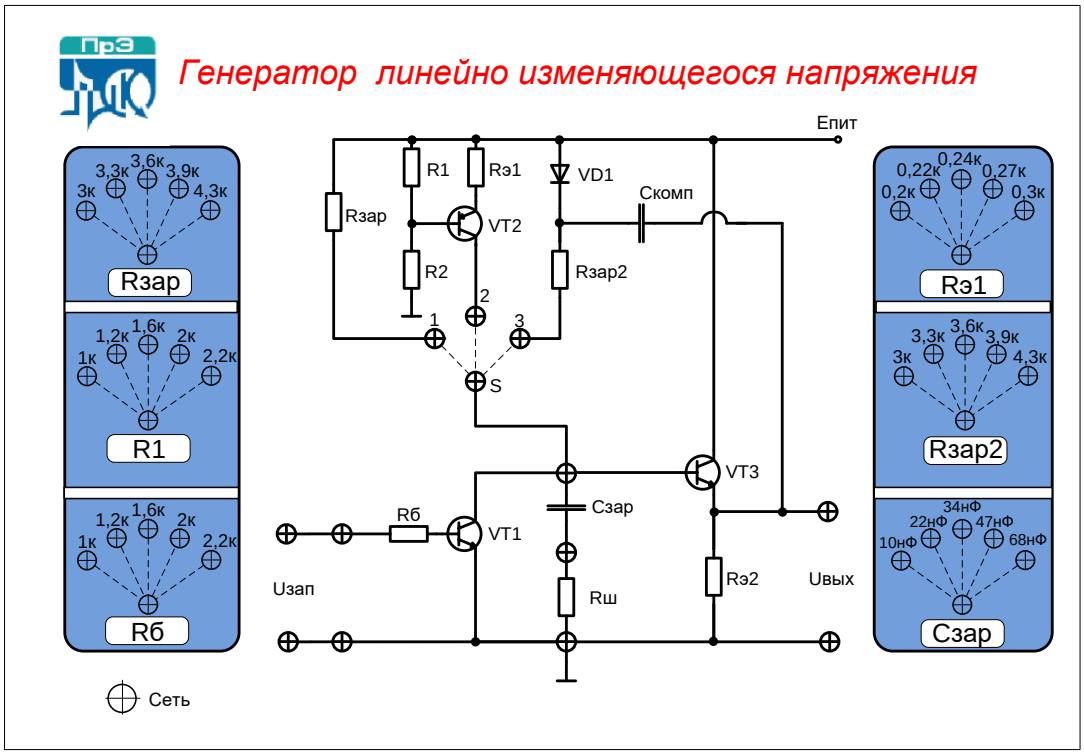


Рис. 4. Схема лицевой панели лабораторного макета

Назначение элементов управления:

Штекер *S* позволяет устанавливать необходимую схему ГЛИН:

1 — простейший генератор пилообразного напряжения;

2 — генератор со стабилизатором тока на биполярном транзисторе;

3 — генератор с компенсирующей ЭДС.

Переключение штекеров в соответствующие гнезда позволяет устанавливать номиналы $R_б$, $R_{зар}$, R_1 и других элементов схемы в соответствии с заданием.

3.4.2. Контрольные вопросы

Какой принцип используется для получения линейно изменяющегося напряжения?

Какими параметрами характеризуется линейно изменяющееся напряжение?

От чего зависит величина коэффициента нелинейности ЛИН? Какие методы используются для снижения коэффициента нелинейности ЛИН?

3.4.3. Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых цепей, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, временные диаграммы входных и выходных сигналов, выводы по каждому пункту программы работы, а также ответы на контрольные вопросы.

3.5. Описание лабораторного комплекса

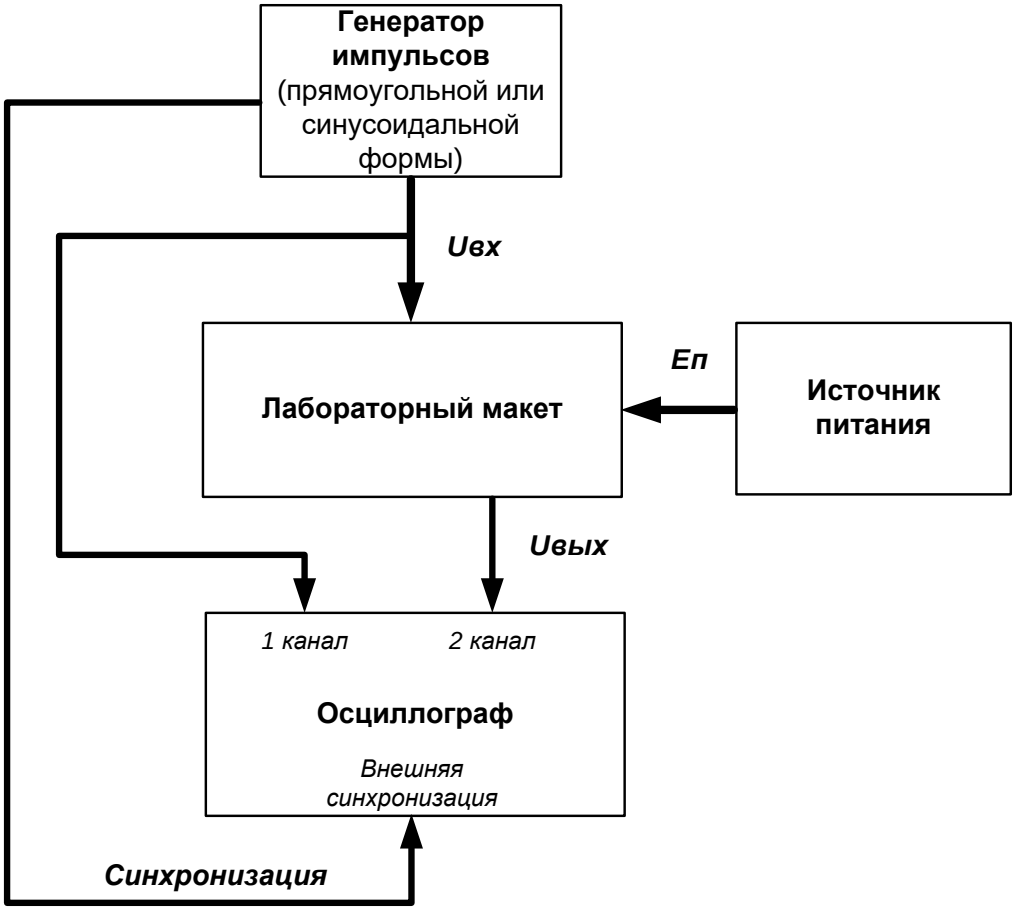


Рис. 5 Структурная схема лабораторного стенда

В ходе выполнения лабораторных работ по дисциплине «Схемотехника»

предполагается использование лабораторного стенда (Рис. 5), состоящего из следующих лабораторных приборов:

- лабораторный макет (соответствующий лабораторной работе);
- источник питания;
- осциллограф;
- генератор импульсов.

3.5.1. Источник питания

С помощью источника (Рис. 6) осуществляется питание лабораторных макетов с возможностью регулировки напряжения питания 0÷20 В. Включение источника питания производится тумблером (Рис. 6 – 1). Для подключения лабораторного макета имеется специальный разъем (Рис. 6 – 2). Установка напряжения питания производится регулятором (Рис. 6 – 3) с помощью встроенного вольтметра (Рис. 6 – 4).

Рис. 6 Лицевая панель источника питания:
1 — выключатель сети; 2 — разъем для подключения лабораторных макетов; 3 — регулировка 0÷20 В; 4 — встроенный вольтметр

3.5.2. Генератор импульсов

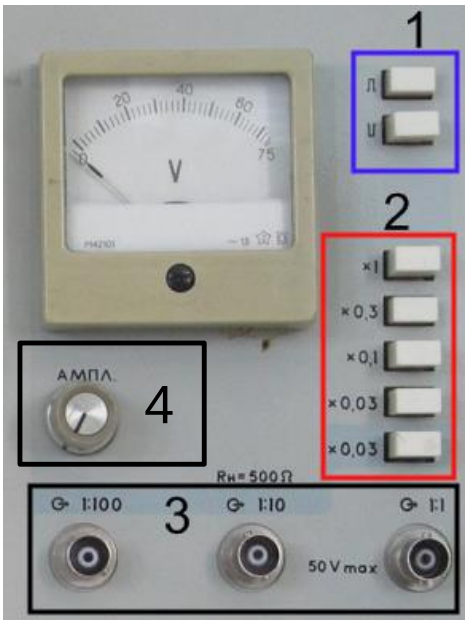
Генераторы импульсов в рамках данного лабораторного практикума используются для подачи сигналов с заданными параметрами (амплитуда, частота, длительность, временной сдвиг) на вход исследуемых схем. В лаборатории имеются генераторы двух видов:
генератор прямоугольных импульсов Г5-54 (Рис. 7);
генератор сигналов низкочастотный Г3-112/1 (Рис. 8).

3.5.3. Генератор прямоугольных импульсов

Лицевая панель генератора прямоугольных импульсов Г5-54 приведена на Рис. 7. Частота повторения, временной сдвиг и длительность импульсов устанавливаются с помощью соответствующих лимбов с учетом выбранного множителя. На лимбах две шкалы – белая и черная, параметры устанавливаются по

той шкале, клавиша множителя которой нажата.
Переключатели временного сдвига позволяют осуществить задержку выходных импульсов относительно импульса синхронизации.

а



б

Рис. 7 Лицевая панель генератора прямоугольных импульсов Г5-54

Установка амплитуды выходных импульсов осуществляется дискретно с помощью набора переключателей (Рис. 7, б – 2) и плавно ручкой потенциометра «АМПЛ» (Рис. 7, б – 4). Амплитуда выходных импульсов контролируется осциллографом. Выходы ***1:10*** и ***1:100*** работают только тогда, когда нажата клавиша ***x0,03.*** Полярность выходных импульсов устанавливается переключателями (Рис. 7, б – 1).

3.5.4. Генератор сигналов низкочастотный

В случаях, когда на вход схемы необходимо подать синусоидальное напряжение следует использовать генератор низкочастотных сигналов (Рис. 8).

Рис. 8 Лицевая панель генератора прямоугольных импульсов Г3-112/1

На Рис. 8 показаны основные органы управления генератором: 1 — регулировка амплитуды выходного сигнала с учетом множителя; 2 — выход; 3 — установка формы сигнала; 4 — регулировка частоты с учетом множителя; 5 — вывод синхронизации.

3.5.5. Осциллограф

В лаборатории электронных цепей имеется два вида осциллографов (Рис. 9, *а* и Рис. 9, *б*), имеющих незначительные отличия.

а)

б)

Рис. 9 Лицевые панели осциллографов

Осциллографы, имеющиеся в лаборатории, являются двухканальными, имеют возможность внешней синхронизации.

Назначение основных органов управления осциллографом представлены на схеме (Рис. 10):

1 — **SOURCE** — переключатель режима синхронизации:

CH1 — по сигналу 1-го канала;

CH2 — по сигналу 2-го канала;

EXT — внешняя синхронизация (синхроимпульс подается на вход EXT).

2 — **VAR** — переключатели режимов отображения по типу сигнала для каждого из каналов:

AC — переменный сигнал;

GND — земля;

DC — постоянный сигнал.

3 — **VERT MODE** — выбор режима отображения по каналам:

CH1 — первый канал;

CH2 — второй канал;

DUAL — двухканальный;

ADD — геометрическая сумма сигналов первого и второго каналов.

4 — **VAR SWEEP** — пропорциональное изменение сигнала по оси времени (при снятии временных характеристик должен находиться в крайнем правом положении).

Для удобства измерения осциллограф имеет также развертку по амплитуде для каждого канала (**Volt/DIV**) и развертку по времени (**TIME/DIV**).

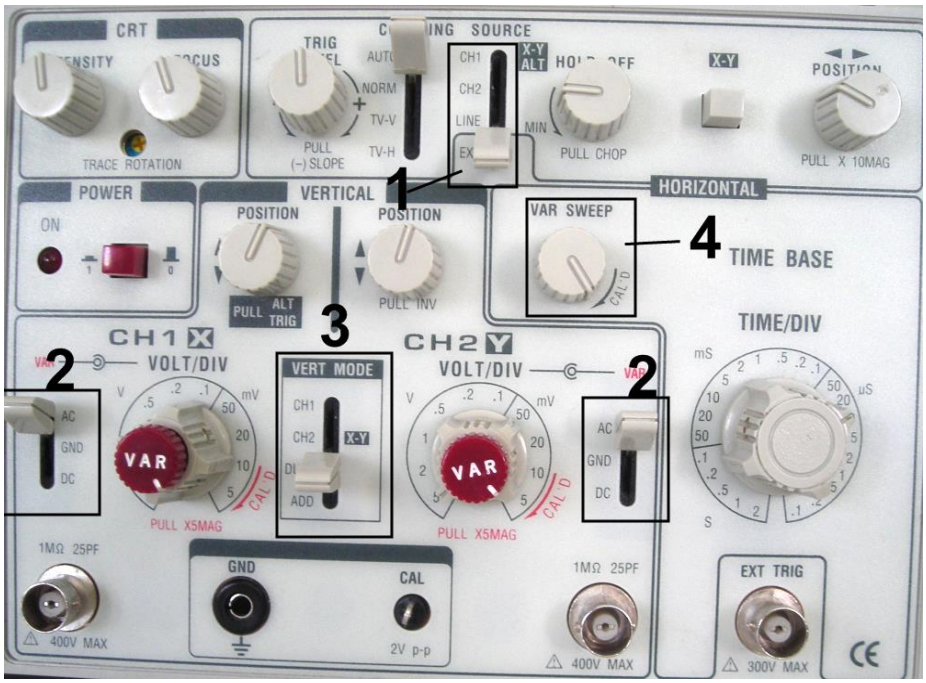


Рис. 10 Основные органы управления осциллографом

4. Подготовка к практическим занятиям

Подготовка к практическим занятиям состоит в предварительном литературном поиске на тему предстоящей работы, изучении лекционного материала, написании и оформлении отчета по практической работе. Проверка выполнения работы состоит в *защите подготовленного отчета по практической работе*.

Таблица 5. Наименование практических занятий (семинаров)

Названия разделов	Наименование практических занятий (семинаров)	Трудоемкость, ч
1 Параметры и характеристики импульсных сигналов	Импульс. Импульсная последовательность. Частота, скважность, относительная длительность. Переходные процессы, апериодические звенья.	2
	Итого	2
2 Ключевые устройства, разновидности ключей, переходные процессы в ключевых устройствах	Переходные процессы в ключевых устройствах. Процессы в биполярном транзисторе в режиме ключа. Насыщение транзистора.	2
	Итого	2
3 Основные параметры цифровых интегральных схем и их схемотехника	Формирование логических уровней RS-триггер на дискретных элементах. Варианты схем управления.	2
	Итого	2
4 Таймер, ЦАП, ЗУ	Интегральный таймер и его применение. Матрицы ЗУ, преобразование кода в напряжение.	2
	Итого	2
5 Мультивибраторы	Варианты схем автоколебательных мультивибраторов. Мультивибраторы с трансформаторной связью и блокинг-генераторы.	2
	Итого	2
6 Генераторы линейно нарастающего и линейно падающего	ГЛИН, принцип действия, математическая модель, методики расчета, реализация на аналоговых элементах	4
	Итого	4

напряжения		
7 Способы регулирования напряжения и тока в устройствах преобразовательной техники	Источники питания на основе ключевых схем. ШИМ. Формирование алгоритмов управления ключевыми источниками питания на основе аналоговых цепей. Математическое описание	4
	Итого	4
Итого за семестр		18

Основным учебно-методическим пособием по данному курсу лабораторных работ является следующее:

Воронин А.И. Схемотехника. Учебно-методическое пособие для проведения практических работ / А.И. Воронин, Ю.Н. Тановицкий, А.В. Топор; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 71 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 54., скачать которое можно по ссылке с сайта кафедры: http://ie.tusur.ru/docs/vai/st_ump.pdf

Дополнительная литература приводится в списке литературы в конце данного учебного пособия.

Ниже приводится перечень практических работ для подготовки в режиме самостоятельной работы.

Часть практических работ выполняется в виде расчетных работ, а часть – в виде моделирования схем на компьютере.

Умение рассчитывать схемы электрических цепей – это один из показателей того, что студент усвоил пройденный материал по дисциплине «Схемотехника».

Современные способы проектирования электронных схем, а тем более топологий микро- и наноэлектронных схем, базируются на применении CAD- CAM- CAE- систем, называемых в русскоязычной литературе системами автоматизированного проектирования (САПР). Для обучения проектированию электронных схем применяется моделирующий комплекс ASIMEC.

4.1. Система моделирования электронных схем ASIMEC

Чтобы установить ASIMEC на компьютере, запустите дистрибутив программы ***asimec_nnn.exe*** (nnn – номер версии), выберите директорию, в которой будут храниться файлы, следуйте инструкциям. Последнюю версию программы можно скачать с официального сайта программы: http://www.asimec.com или с сайта авторов программного продукта: http://devil.tomsk.ru/asimec/asimec_install.exe.

После инсталляции программы рекомендуем запустить исполняемый файл asimec.exe, визуально исследовать интерфейс программы, загрузить несколько

примеров со схемами из каталога DEMO (и его подкаталогов) командой *Открыть* из главного меню *Файл*, запустить процесс моделирования (кнопка *Анализ*), попытаться изменить параметры элементов схемы и снова провести моделирование. После этого вернуться к изучению описания.

После запуска ASIMEC перед Вами открывается *основное окно*. Его вид представлен на рисунке (Рис. 11).

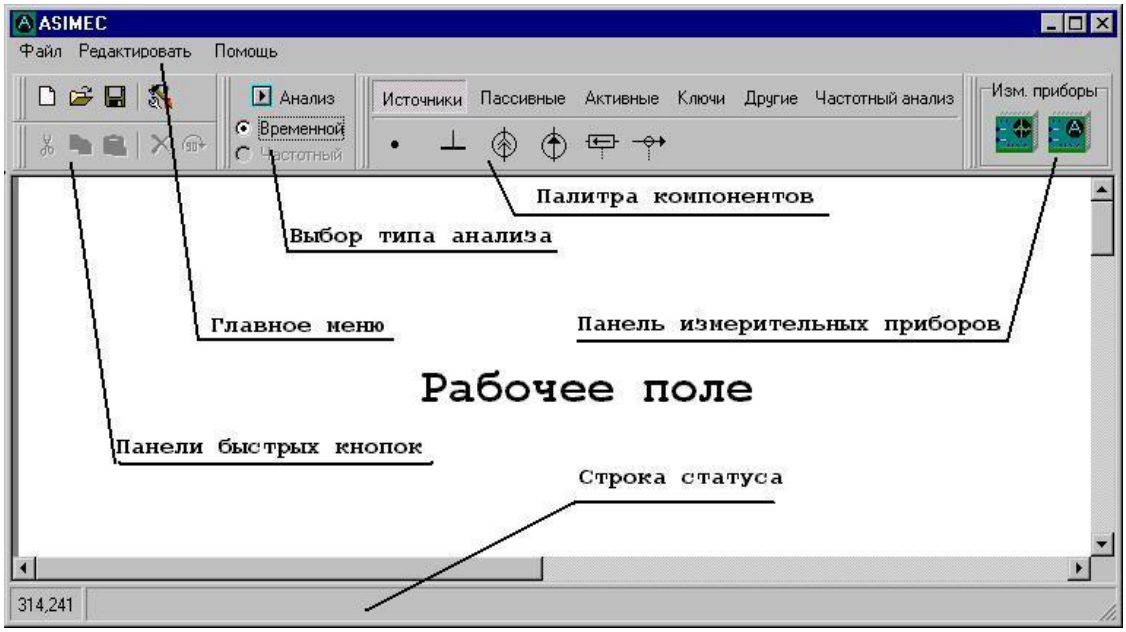


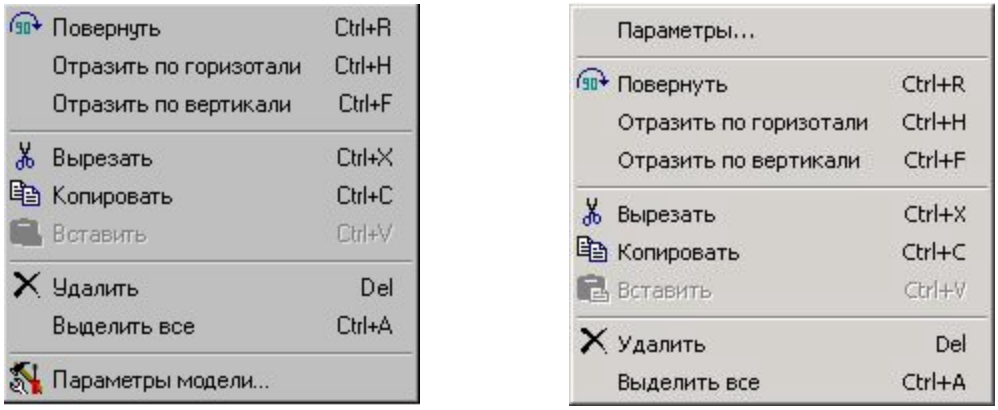
Рис. 11. Рабочее окно ASIMEC

В верхней части окна ASIMEC вы видите *полосу главного меню.* Элементы главного меню предоставляют возможность вызывать все основные команды. Ниже полосы главного меню расположены *инструментальные панели.* На левой панели друг под другом находятся два ряда *быстрых кнопок*, дублирующих некоторые, наиболее часто используемые команды меню. Правее них расположена инструментальная панель, позволяющая выбрать тип анализа (временной/частотный) и кнопка запуска. Далее располагается самая крупная панель, содержащая *палитру электронных компонентов*. Небольшая инструментальная панель, располагающаяся справа, содержит набор компонентов – измерительных приборов.

Основное (*"Рабочее"*) поле окна представляет собой область размещения компонентов из палитры и их соединения. Краткие подсказки по элементам управления можно получить во всплывающих окнах, если на некоторое время поместить на них курсор мыши. Подсказки отображаются также в *строке статуса*.

Раздел главного меню *Файл* позволяет создать новый проект, открыть ранее созданный проект, сохранить текущий проект в файле с заданным именем и выйти из системы. Функции команд – понятны по названию. В нижней части панели меню находится список проектов, с которыми проводилась работа в последнее время. Запоминается четыре последних проекта. Ряд элементов меню имеет комбинацию "горячих клавиш", позволяющих быстро выполнять те или иные операции простым нажатием их на клавиатуре. Такие комбинации отображаются в меню справа от команд. Пиктограммы на инструментальных панелях соответствуют изображениям в главном меню.

Раздел меню *Редактировать* позволяет выполнять операции копирования, удаления выделенных элементов, их вращения, зеркального отображения. Вид раздела представлен на рисунке (Рис. 12).



а *б*

Рис. 12. Раздел «Редактировать» главного меню (*а*) и всплывающее меню (*б*)

Раздел меню *Помощь* позволяет вызвать встроенную справочную систему.

Помимо главного меню в ASIMEC имеется несколько *контекстных всплывающих меню*. Контекстное меню вызывается нажатием правой кнопки мыши в *рабочей области* основного окна – рабочее поле. Наиболее полный вариант меню соответствует нажатию правой кнопки мыши на элементе, размещенном в рабочей области. Вид всплывающего окна меню приведен на рисунке. Команды *Вставить, Вырезать, Копировать, Удалить, Выделить все* присутствуют во всех вариантах всплывающего меню. Их назначение - работа с внутренним буфером обмена ASIMEC. Команды изменения положения графического изображения элемента на схеме соответствуют командам раздела *Редактировать* главного меню.

Команда *Параметры* вызывает окно настройки параметров элементов. Его вид зависит от типа компонента.

Палитра компонентов разделена на шесть групп, переключение между которыми осуществляется щелчком мыши на соответствующем названии группы (*Источники / Пассивные / Активные / Ключи / Другие / Частотный анализ*). Состав каждой группы можно увидеть после запуска программы.

Создание схемы состоит из следующих этапов: размещение необходимых компонентов и измерительных приборов на *рабочее поле*; соединение выводов компонентов проводниками и задание параметров компонентов (Рис. 13).

Для того, чтобы поместить компонент в рабочее поле, необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по его изображению на палитре компонентов. После этого переместить курсор на то место в рабочей области, где нужно поместить элемент, и щелкнуть еще раз.

После того, как компоненты размещены в рабочей области, их можно объединить в группу (выделить). Для этого достаточно щелкнуть левой кнопкой мыши в рабочей области и, не отпуская, потянуть вправо вниз. При этом появится прерывистый прямоугольник, и после отпускания кнопки мыши компоненты схемы, оказавшиеся внутри его, окажутся выделены. Щелчок мышью на пустом месте рабочей области убирает выделение. Выделенные компоненты можно перемещать, копировать, удалять, вращать и т.д.

Для того, чтобы соединить два вывода, необходимо подвести курсор мыши к первому выводу до появления синей точки. Далее щелкните мышью и, не отпуская, тяните проводник ко второму выводу. Когда на нем появится синяя точка, отпустите клавишу мыши – на схеме появится проводник.

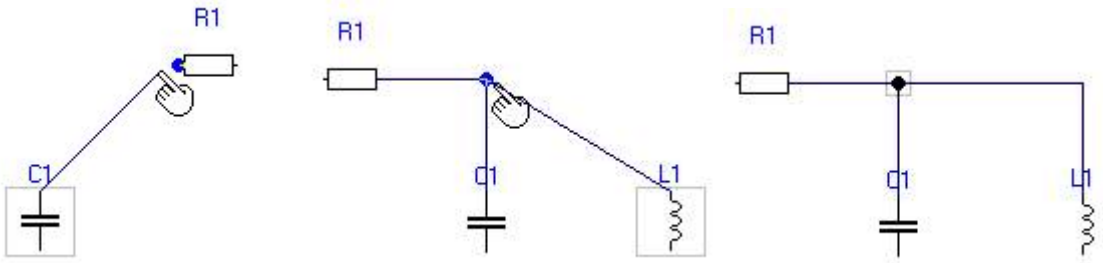


Рис. 13. Работа с компонентами и проводниками

Для удаления соединения между выводами, подведите курсор мыши к концу вывода элемента, в том месте, где он соединяется с проводником, и после появления синей точки, нажмите левую клавишу мыши. Далее, не отпуская клавишу, оттащите указатель соединения на пустое место в сторону от вывода элемента, и после того как синяя точка пропадет, отпустите клавишу.

Если при протягивании соединения подвести курсор мыши к проводнику, и после появления синей точки отпустить клавишу мыши, автоматически создастся точка и к ней подсоединится проводник.

Параметры, размещенных на схеме, компонентов можно задать в меню, которые появляются после двойного щелчка мыши по ним.

Чтобы скопировать схему в отчет выделите ее прямоугольником, образованным при нажатии левой кнопки мыши и ее перемещении (кнопку мыши необходимо при этом удерживать). Нажмите клавишу *Alt* и только после этого отпустите кнопку мыши. Рисунок схемы будет скопирован в буфер Windows, для дальнейшего использования во внешних приложениях.

4.2. Практическая работа 1. Исследование цифроаналоговых преобразователей

Целью практической работы является изучение принципов работы цифроаналоговых преобразователей и исследование их свойств на матрицах: двоично-взвешенных резисторов и R-2R.

Преобразование аналоговых величин в цифровые, а также цифровых в аналоговые – практически основная операция в вычислительных и управляющих машинах.

Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) можно представить в виде управляемого потенциометра, который создает на выходе аналоговый сигнал (напряжение или ток), отображающего нормированную часть его заданной полной шкалы. Выходное напряжение или ток зависят от значения опорного напряжения, выбираемого для задания полной шкалы выходного сигнала. Если опорное напряжение изменяется в соответствии с аналоговым сигналом, то выходной сигнал пропорционален произведению цифрового числа и аналогового входного сигнала, такой ЦАП называется перемножающим. Полярность произведения зависит от полярности аналогового сигнала, цифровой системы кодирования и характера преобразования. Если ЦАП воспринимает опорные сигналы как положительной, так и отрицательной полярности цифровой сигнал биполярный, происходит четырехквадрантное умножение.

4.2.1. Параметры и характеристики ЦАП

Особенности построения и функционирования ЦАП характеризуют несколько десятков электрических параметров. Основные параметры преобразователей регламентируются нормативно-технической документацией. Рассмотрим параметры, наиболее полно описывающие работу преобразователей в статическом и

динамическом режимах при воздействии внешних факторов. Международные буквенные обозначения электрических параметров указаны в скобках.

Число разрядов *N(b)* – количество разряда кода, связанного с аналоговой величиной, которое может воспринимать ЦАП. Для двоичных ЦАП в соответствии с ГОСТ 24736-81 под числом разрядов понимается двоичный логарифм максимального числа кодовых комбинаций на входе ЦАП.

Младший разряд МР (LR) – это цифра, которая имеет наименьшую величины или вес. Единица МР по отношению к полной шкале определяет разрешающую способность цифрового числа.

Старший разряд СР (MR) – эта цифра (или разряд), которая имеет наибольшую величину или вес. СР, как правило, равен половине полной шкалы.

Разрешающая способность – это значение выходного сигнала, соответствующее разности между двумя уровнями выходных напряжений, обусловленными подачей двух смежных кодов, т.е. в реальных системах – это напряжение в единицы милливольт. Разрешающая способность должна быть в диапазоне единицы МР.

Точность – это отклонение выходного напряжения, как правило, в процентах при изменении температуры.

Монотонность характеристики преобразования – идентичность знака приращения мгновенных значений входного и выходного сигналов преобразователя. Монотонный преобразователь – это такой ЦАП, у которого ступени выходного сигнала либо увеличиваются, либо остаются неизменными при соответствующем изменении входного сигнала. Если меняется знак приращения преобразователя при единичном изменении кода, то такой преобразователь считается немонотонным.

4.3. Практическая работа 2. Исследование автоколебательного блокинг-генератора (Мультивибратора с трансформаторной связью)

Блокинг-генератором (БГ) называют релаксационный генератор с трансформаторной нагрузкой и положительной обратной связью, осуществляемой через дополнительную обмотку трансформатора. Поэтому такое устройство еще называют мультивибратором с трансформаторной связью.

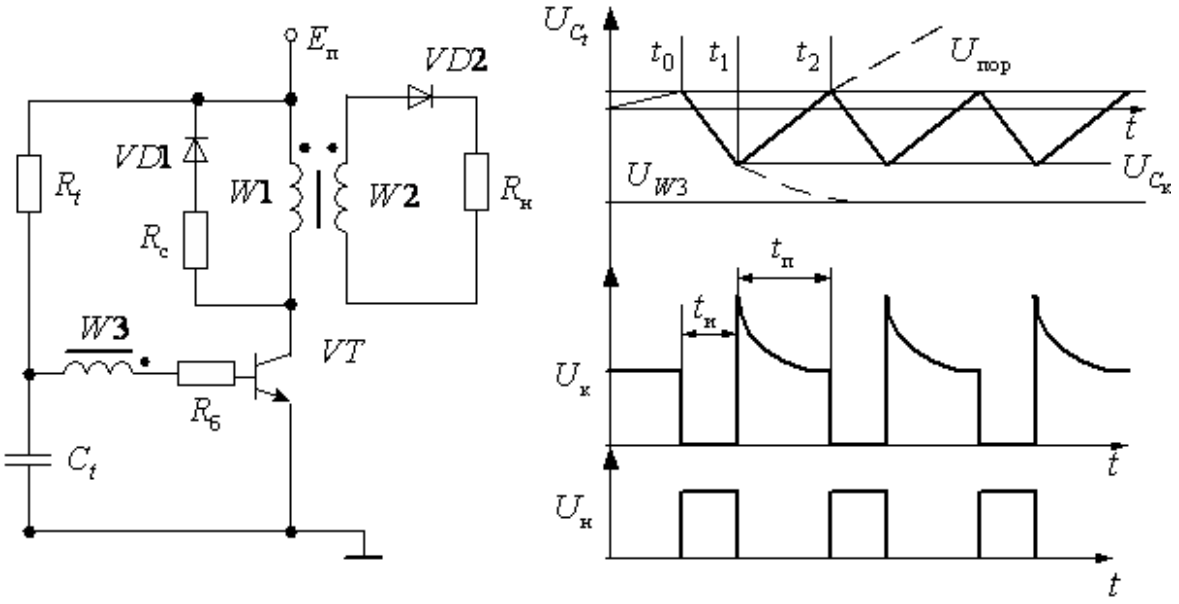
Схемотехнически БГ состоит из ключевого усилительного каскада, как правило, выполненного по схеме с ОЭ, и нагрузки, подключенной через импульсный трансформатор. Как и любой релаксационный генератор, блокинг-генератор может работать в ждущем и автоколебательном режимах. В данной работе предлагается исследовать блокинг-генератор, работающий в автоколебательном режиме. Принципиальная схема автоколебательного блокинг-

генератора приведена на Рис. 14, *а*.

Автоколебательный режим обеспечивается подачей положительного напряжения от источника $E_п$ на базу транзистора через резистор R_t. Вследствие этого блокинг-генератор не имеет устойчивого состояния.

После включения питания в момент времени $t = t_0$ происходит прямой блокинг-процесс и формируется фронт импульса, так как к этому времени напряжение на конденсаторе C_t достигает порогового напряжения базо-эмиттерного перехода, затем транзистор входит в режим насыщения и происходит формирование вершины.

В процессе формирования вершины конденсатор C_t стремится перезарядиться до напряжения обмотки $W3$ базовым током транзистора. Величина тока в начальный момент определяется как $I_б = \frac{U_{W3}}{R_б}$, однако по мере перезаряда величина тока уменьшается и в определенный момент, когда ток базы достигнет своего конечного значения $I_{б_к} \le \frac{I_к}{\beta}$, процесс перезаряда закончится и напряжение на конденсаторе достигнет величины $U_{C_к}$. В момент времени $t = t_1$ происходит обратный блокинг-процесс, и транзистор запирается. При этом ЭДС самоиндукции обмотки и напряжение конденсатора согласно приложены к базо-эмиттерному переходу в запирающей полярности.



а *б*

Рис. 14. Автоколебательный блокинг-генератор (*а*),
временные диаграммы его работы (*б*)

В течение времени восстановления транзистор находится в режиме отсечки. В это время происходит заряд конденсатора по цепи резистор R_t - источник $E_п$.

Напряжение на конденсаторе C_t меняется от $-U_{C_к}$ до $U_{пор}$, стремясь к значению $E_п$. В связи с вышеизложенным интервалы времени заряда и перезаряда будут определяться по следующим выражениям:

$$t_и = (t_1 - t_0) = R_б C_t \ln \frac{U_{W3} + U_{пор}}{U_{W3} - U_{C_к}},,$$

где $U_{C_к} = U_{W3} - U_{пор} - I_{бк} R_б$;

$$t_п = (t_2 - t_1) = R_t C_t \ln \frac{E_п + U_{C_к}}{E_п - U_{пор}}.$$

Одновременно с зарядом конденсатора проходит сброс энергии сердечника на резистор $R_с$. Как правило, время заряда больше времени сброса поэтому в расчетах таких генераторов время сброса не учитывают. В некоторый момент времени t_2 напряжение на конденсаторе, а, следовательно, и напряжение на базо-эмиттерном переходе достигают значения $U_{пор}$, транзистор открывается и процессы повторяются.

4.3.1. Расчет автоколебательного блокинг-генератора

Одним из пунктов практической работы является расчет схемы автоколебательного блокинг-генератора по заданным параметрам согласно варианту.

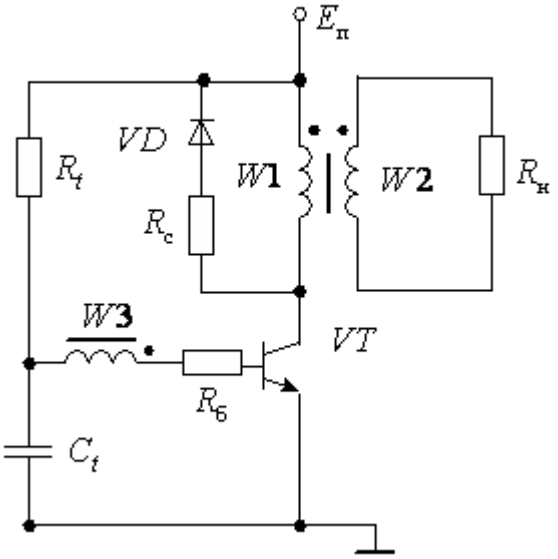


Рис. 15. Автоколебательный блокинг-генератор с времязадающей цепью

В макете используются транзистор КТ3102А с параметрами:

$I_{ктах}$ = 100 мА;

$U_{кэ}$ = 50 В;

$U_{пор}$ = 0,5 В;

и генератор прямоугольных импульсов с параметрами:

$U_з$ = 5 В;

$t_{зи}$ = 1 мкс;

T = 40 мкс.

Заданные параметры схемы (Рис. 15) берутся из таблицы, приведенной в учебном пособии, согласно варианта выполнения практической работы.

Рассмотрим пример:

$U_н$ = 25 В;

$R_н$ = 500 Ом;

$E_п$ = 25 В;

β = 100.

Расчет:

Рассчитаем ток нагрузки:

$$I_н = \frac{U_н}{R_н} = \frac{25}{500} = 50 \text{ мА}.$$

Коэффициент трансформации:

$$k_{т13} = \frac{E_п}{U_н} = \frac{25}{25} = 1.$$

Коллекторный ток:

$$I_к = \frac{I_н}{k_{т13}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1} = 50 \text{ мА}.$$

Базовый ток, при котором транзистор закроется:

$$I_б = \frac{I_к}{\beta} = \frac{0,05}{100} = 500 \text{ мкА}.$$

Максимальный базовый ток

$$I_{б\max} = \frac{I_{к\max}}{\beta} = \frac{0,1}{100} = 1 \text{ мА}.$$

Коэффициент трансформации базовой обмотки:

$$k_{т12} = \frac{E_п}{U_{W3}} = \frac{25}{3} = 8,33.$$

Диапазон выбора базового резистора вычисляется по формулам:

$$R_{б\max} = \frac{U_{W3}}{I_б} = \frac{3}{500 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ кОм};$$

$$R_{б\min} = \frac{U_{W3}}{I_{б\max}} = \frac{3}{0,001} = 3 \text{ кОм}.$$

Выберем $R_б$ = 3,5 кОм.

Резистор сброса энергии рассчитывается из условия, что к транзистору в запертом состоянии прикладывается напряжение $U_{кmax} = 2E_n$:

$$R_c = \frac{E_n}{I_к} = \frac{25}{0,05} = 500 \text{ Ом}.$$

В связи с тем, что в схеме используется конденсатор емкостью C_t = 10 нФ, вычислим время импульса:

$$t_u = (t_1 - t_0) = R_б C_t \ln \frac{U_{W3} + U_{пор}}{U_{W3} - U_{Ck}},$$

где U_{Ck} - максимальный заряд конденсатора. Вычисляется последующей формуле:

$$U_{Ck} = U_{W3} - U_{пор} - I_б R_б = 3 - 0,5 - 3000 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ В}.$$

Отсюда найдем время импульса:

$$t_u = 3000 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \ln \frac{3 + 0,5}{3 - 1} = 17 \text{ мкс}$$

Исходя из того, что время паузы должно быть больше времени импульса, примем время паузы t_n = 20 мкс.

$$t_n = (t_2 - t_1) = R_t C_t \ln \frac{E_п + U_{C_к}}{E_п - U_{пор}}.$$

Отсюда найдем номинал резистора R_t:

$$R_t = \frac{t_n}{C_t \ln \frac{E_п + U_{C_к}}{E_п - U_{пор}}} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-9} \ln \frac{25 + 1}{25 - 0,5}} \approx 30 \text{ кОм}.$$

Рассчитаем параметры трансформатора, определив индуктивности обмоток *l2* и *l3*, зная индуктивность первичной обмотки *l1*.

$$K_{m12} = \sqrt{\frac{l2}{l1}} \Rightarrow l2 = l1 \cdot K_{m12}{}^2 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 8,33^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$K_{m13} = \sqrt{\frac{l3}{l1}} \Rightarrow l3 = l1 \cdot K_{m23}{}^2 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.$$

4.4. Практическая работа 3. Исследование ждущего блокинг-генератора (мультивибратора с трансформаторной нагрузкой и положительной обратной связью)

Блокинг-генератором (БГ) называют релаксационный генератор с трансформаторной нагрузкой и положительной обратной связью, осуществляемой через дополнительную обмотку трансформатора. Поэтому такое устройство еще называют мультивибратором с трансформаторной связью. Схемотехнически БГ состоит из ключевого усилительного каскада, как правило, выполненного по схеме с ОЭ, и нагрузки, подключенной через импульсный трансформатор.

Как и любой релаксационный генератор, блокинг-генератор может работать в ждущем и автоколебательном режимах. В данной практической работе предлагается исследовать блокинг-генератор, работающий в ждущем режиме. Принципиальная схема ждущего блокинг-генератора приведена на Рис. 16, *а*.

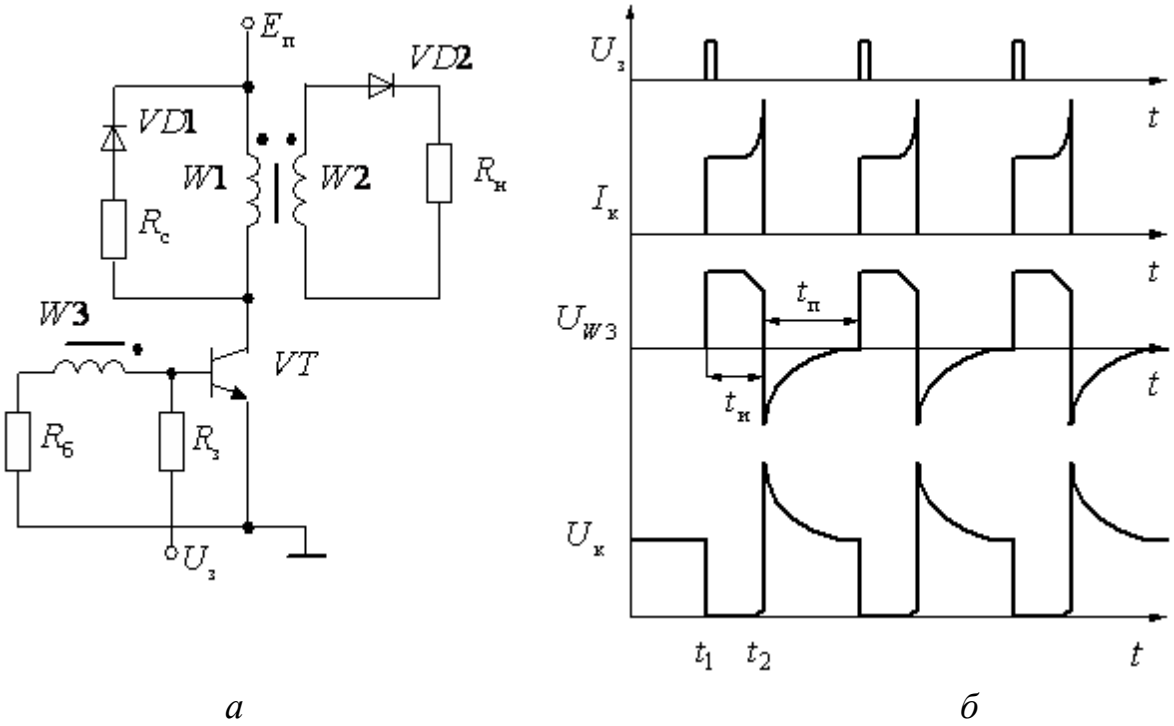


Рис. 16. Ждущий блокинг-генератор на биполярном транзисторе: схема замещения (*а*); временные диаграммы (*б*)

Запуск ждущего блокинг-генератора осуществляется подачей сигнала запуска $U_з$ в цепь базы или импульсами отрицательной полярности, подаваемыми в коллекторную цепь транзистора. Выходной сигнал снимается либо со специальной обмотки *W*2, либо с коллектора транзистора через разделительный конденсатор.

Принцип действия ждущего блокинг-генератора иллюстрируют диаграммы, представленные на Рис. 16, *б*.

Исходное состояние – транзистор закрыт, поскольку напряжение на базе $U_б$ меньше порогового уровня базо-эмиттерного перехода (чтобы транзистор не открылся под действием напряжения, создаваемого током I_{k0}, протекающим через резистор $R_б$, необходимо выполнить условие: $I_{k0} \cdot R_б \le U_{пор}$, где I_{k0} и $U_{пор}$ – паспортные параметры транзистора).

Напряжение на коллекторе закрытого транзистора $U_k \cong E_n$. Энергия магнитного поля сердечника равна нулю, соответственно значение рабочей индукции $B = B_r$.

Формирование фронта выходного импульса (прямой блокинг-процесс). В момент $t = t_1$ на вход цепи запуска подается импульс $U_з$, по резистору $R_з$ сигнал поступает в базовую цепь. Под действием этого сигнала транзистор начинает открываться, что приводит к возникновению тока коллекторной цепи. Ток, протекающий по обмотке *W*1, индуцирует в базовой обмотке *W*3 ЭДС $e_б \ge U_{пор}$ пропорционально напряжению питания и коэффициенту трансформации, в полярности, обеспечивающей отпирание транзистора. Появляется нарастающий коллекторный ток I_k. Ток I_k создает в сердечнике трансформатора изменяющийся магнитный поток, который наводит в базовой обмотке ЭДС большей величины, что приводит к увеличению базового, а следовательно, и коллекторного тока, и т. д.

Пока транзистор находится в активном режиме, коэффициент усиления больше единицы и процесс развивается лавинообразно. В ходе этого процесса, называемого прямым блокинг-процессом, формируется фронт импульса. Формирование происходит так быстро, что энергия магнитного поля в сердечнике практически не успевает измениться.

Заканчивается прямой блокинг-процесс полным отпиранием транзистора и переходом его в режим насыщения. Глубина насыщения транзистора определяется током нагрузки, пересчитанным через коэффициент трансформации между обмотками *W*1 и *W*2, и током базы, величина которого зависит от напряжения обмотки *W*3 и величины резистора $R_б$. Следует отметить, что, как только начался блокинг-процесс, импульс запуска может быть прекращен.

Формирование вершины импульса. После окончания прямого блокинг-процесса с момента времени t_1 формируется вершина импульса. Под действием напряжения, приложенного к первичной обмотке *W*1, в ней появляется ток и начинается процесс намагничивания сердечника трансформатора, а также изменение рабочей индукции от значения B_r до B_s. Этот процесс продолжается в течение интервала времени от t_1 до t_2, что в выражении (4.2) соответствует Δt. Когда

величина рабочей индукции достигает значения B_s, процесс передачи энергии между обмотками трансформатора прекращается, что приводит к увеличению тока коллектора и уменьшению напряжения в базовой обмотке (Рис. 16, *б*).

Пока транзистор находится в режиме насыщения, напряжение на коллекторе не меняется: $U_k = U_{knac} \square 0$, но так как базовый ток в связи с уменьшением напряжения базовой обмотки уменьшается и в это же время происходит увеличение коллекторного тока из-за намагничивания трансформатора в момент времени t_2, транзистор выходит на границу режима насыщения. На этом формирование вершины импульса заканчивается.

Обратный блокинг-процесс. В момент перехода транзистора в активный режим t_2 восстанавливается цепь положительной обратной связи и возникает лавинообразный процесс обратного опрокидывания: уменьшение коллекторного тока вызывает уменьшение напряжения на базовой обмотке$U_б$, что ведет к дальнейшему уменьшению I_k и т. д.

Как только ЭДС в базовой обмотке по абсолютному значению станет меньше напряжения на базо-эмиттерном переходе транзистора, он закроется.

Переход транзистора из открытого состояния в закрытое осуществляется почти мгновенно, так что энергия, запасенная в магнитном поле трансформатора, не успевает измениться. По закону самоиндукции ЭДС в базовой и коллекторной обмотках меняет полярность на противоположную, чтобы воспрепятствовать уменьшению магнитного поля. ЭДС самоиндукции в базовой обмотке *W*3 способствует более быстрому запиранию транзистора, так как на начале обмотки в это время индуцируется напряжение минусовой полярности.

В это же время под воздействием ЭДС самоиндукции в обмотке *W*1 открывается диод *VD*1 и по резистору сброса энергии R_c начинает протекать ток. Величина тока резистора в начальный момент ровна току транзистора на момент выключения.

Восстановление. После запирания транзистора энергия, запасенная в сердечнике трансформатора, рассеивается на резисторе R_c по цепи конец обмотки *W*1 – резистор R_c – диод *VD*1 – начало обмотки *W*1. Сброс энергии протекает по экспоненциальному закону. Следующий запускающий импульс можно подавать только после того, как закончится процесс сброса энергии сердечника трансформатора, т.е. время паузы t_n между запускающими импульсами должно быть больше времени сброса.

4.4.1. Расчет ждущего блокинг-генератора

Умение рассчитывать схемы электрических цепей – это один из показателей, что студент усвоил пройденный материал по дисциплине «Схемотехника». Одним из пунктов данной практической работы является расчет схемы автоколебательного блокинг-генератора по заданным параметрам согласно варианту.

В макете используются транзистор КТ3102А с параметрами:

$I_{ктах}$ = 100 мА;

$U_{кэ}$ = 50 В;

$U_{пор}$ = 0,5 В;

и генератор прямоугольных импульсов с параметрами:

$U_з$ = 5 В;

$t_{зи}$ = 1 мкс;

T = 40 мкс.

Заданные параметры схемы берутся из таблицы, приведенной в учебном пособии, согласно варианта выполнения практической работы.

Рассмотрим пример:

$U_н$ = 25 В;

$R_н$ = 500 Ом;

$E_п$ = 25 В;

β = 100.

Расчет:

Ток нагрузки:

$$I_н = \frac{U_н}{R_н} = \frac{25}{500} = 50 \text{ мА}$$

Коэффициент трансформации:

$$k_{т13} = \frac{E_п}{U_н} = \frac{25}{25} = 1.$$

Коллекторный ток:

$$I_к = \frac{I_н}{k_{т13}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1} = 50 \text{ мА}.$$

Базовый ток, при котором транзистор закроется:

$$I_б = \frac{I_к}{\beta} = \frac{0,05}{100} = 500 \text{ мкА}.$$

Максимальный базовый ток

$$I_{б\max} = \frac{I_{к\max}}{\beta} = \frac{0,1}{100} = 1 \text{ мА}.$$

Коэффициент трансформации базовой обмотки:

$$k_{m12} = \frac{E_n}{U_{W3}} = \frac{25}{3} = 8,33.$$

Диапазон выбора базового резистора вычисляется по формулам:

$$R_{б\max} = \frac{U_{W3}}{I_б} = \frac{3}{500 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ кОм};$$

$$R_{б\min} = \frac{U_{W3}}{I_{б\max}} = \frac{3}{0,001} = 3 \text{ кОм}.$$

Выберем $R_б$ = 3,5 кОм.

Резистор сброса энергии рассчитывается из условия, что к транзистору в запертом состоянии прикладывается напряжение $U_{кmax} = 2E_n$:

$$R_c = \frac{E_n}{I_к} = \frac{25}{0,05} = 500 \text{ Ом}.$$

Исходя из того, что период генератора прямоугольных импульсов по заданию T = 40 мкс, для восстановления выбираем t_n = 25 мкс. В результате получаем:

$$t_n = 3 \cdot Rt \cdot Ct = 25 \text{ мкс}.$$

В связи с тем, что в схеме используется резистор с сопротивлением R_t = 2 кОм, получим:

$$C_t = \frac{t_n}{3 \cdot R_t} = 4 \text{ нФ}.$$

Рассчитаем параметры трансформатора, определив индуктивности обмоток *l2* и *l3*, зная индуктивность первичной обмотки *l1*.

$$K_{m12} = \sqrt{\frac{l2}{l1}} \Rightarrow l2 = l1 \cdot K_{m12}{}^2 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 8,33^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$K_{m13} = \sqrt{\frac{l3}{l1}} \Rightarrow l3 = l1 \cdot K_{m23}{}^2 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.$$

4.5. Практическая работа 4. Расчет многокаскадных ключевых усилителей на биполярных транзисторах

Ключевыми называют усилители, в которых транзисторы работают в режиме ключа и могут находиться только в одном из двух состояний: или закрыт или полностью открыт. Исходными данными к расчету усилителей являются параметры напряжения и тока ($U_н$, $I_н$), которые необходимо коммутировать на нагрузке. Расчет

ведется с оконечного каскада, затем рассчитывается предоконечный каскад и т.д.

По способу подключения нагрузки оконечные каскады разделяются на каскады с изолированной нагрузкой, когда нагрузка включена в коллекторную цепь оконечного транзистора (применяются, когда нагрузкой являются обмотки реле, трансформаторов, световые индикаторы, нагревательные элементы и т.д.), и каскады с нагрузкой, подключенной к общему выводу.

4.5.1. Расчет оконечного ключевого каскада с изолированной нагрузкой

Схема каскада представлена на Рис. 17.

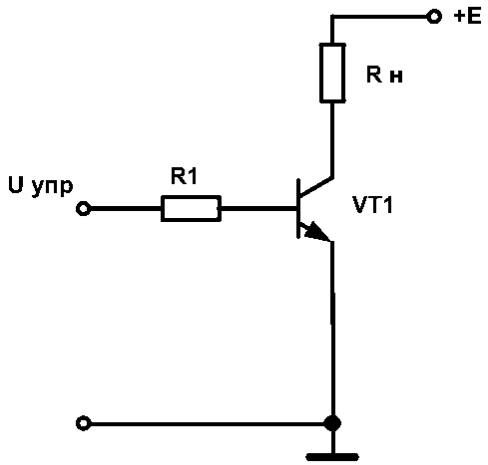


Рис. 17. Ключевой каскад с изолированной нагрузкой

Расчет начинается с выбора напряжения источника питания:

$$E_{пит} = U_н + U_{кэ\ нас},$$

где $U_{кэ\ нас}$ – напряжение коллектор – эмиттер насыщенного ключа, является параметром транзистора, в большинстве случаев составляет доли вольта и при инженерных расчетах, когда $U_н \geq 10 \cdot U_{кэ\ нас}$, может не учитываться.

Следующим шагом выбирается транзистор из условия:

$$U_{кэ\ \max} \geq E_{пит}, \text{ только для активной нагрузки;}$$

$$I_{к\ \max} \geq I_н,$$

$$P_{доп} \leq I_н \cdot U_{кэ\ нас} + P_{дин},$$

где $U_{кэ\ \max}$, $I_{к\ \max}$, $P_{доп}$ – параметры транзистора, $P_{дин}$ – динамические потери, мощность, выделяемая на транзисторе при включении и выключении ключа:

$$P_{дин} = \frac{t_{вкл}}{T} \cdot \frac{I_н \cdot U_н}{2}.$$

Рассчитывается базовый ток транзистора

$$I_б = \frac{K_{нас} \cdot I_к}{\beta_{\min}},$$

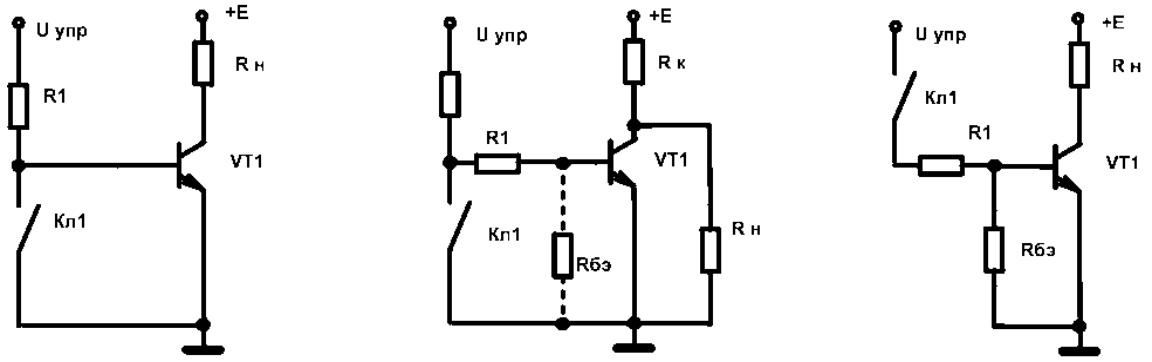
где $\beta_{\min}$ – параметр транзистора, $K_{нас}$ – коэффициент насыщения, применяется для предотвращения перехода транзистора из режима насыщения в активный режим при изменении температуры. Обычно принимают $K_{нас} = 1.2 - 2$, следует помнить, что увеличение $K_{нас}$ приводит к увеличению времени выключения транзистора (за счет увеличения времени рассасывания зарядов в области базы).

Открытое состояние ключа обеспечивается, когда в базу транзистора втекает ток $I_{бэ}$, при этом на переходе база-эмиттер создается падение напряжения $U_{бэ}$. В инженерных расчетах напряжение $U_{бэ}$ для кремниевых транзисторов принимается равным 0,7 В, или определяется по входной характеристике транзистора.

Базовый резистор $R_б$ ограничивает ток $I_б$ и может быть рассчитан по формуле:

$$R_б = \frac{U_{упр} - U_{бэ}}{I_б}.$$

В многокаскадных ключевых усилителях закрывание транзистора обеспечивается или шунтированием перехода база-эмиттер транзистора другим ключом, или прерыванием тока базы (Рис. 18)



а) *б*) *в*)

Рис. 18. Способы запирания транзистора ключевого каскада: непосредственное замыкание перехода база-эмиттер (*а*); замыкание перехода база-эмиттер через резистор (*б*); размыкание цепи протекания базового тока (*в*)

Во всех случаях закрытое состояние ключа обеспечивается, когда $U_{бэ} = 0$, при этом переход база-эмиттер транзистора должен быть зашунтирован внешним сопротивлением $R_{бэ}$. Величина этого сопротивления должна быть такой, чтобы ток $I_{к0}$ (обратный ток коллектора, параметр транзистора), протекающий по цепи

коллектор – база – общий вывод, не создавал на нем падение напряжения, которое могло бы открыть транзистор, $U_{Rбэ} \le 0.4$ В, кроме того, этот резистор обеспечивает цепь вытекания зарядов из области базы в момент выключения, чем способствует скорейшему закрыванию транзистора *VT*1.

В инженерных расчетах при определении $R_{бэ}$ можно руководствоваться следующими рекомендациями:

$$\begin{aligned} &I_к \le 1 \text{ А}, \ \rightarrow \ Rбэ \le 1 \text{ кОм}; \\ &I_к \le 10 \text{ А}, \ \rightarrow \ Rбэ \le 100 \text{ Ом}; \\ &I_к \ge 10 \text{ А}, \ \rightarrow \ Rбэ \le 10 \text{ Ом}. \end{aligned} \qquad 1)$$

На Рис. 18 приведены варианты схем управления транзистором в оконечном каскаде. В промежуточных каскадах в качестве $U_{упр}$ выступает $E_{пит}$.

4.5.2. Расчет оконечных каскадов с нагрузкой, подключенной к общему выводу

Если нагрузка постоянно подключена к общему выводу, применяется несколько схем оконечных каскадов – каскад с общим эмиттером (ОЭ), каскад с общим коллектором (ОК) или каскад ОЭ на транзисторе с обратным типом проводимости.

4.5.2.1. Расчет оконечного каскада ОЭ

Схема каскада представлена на Рис. 19. Расчет каскада состоит из следующих этапов:

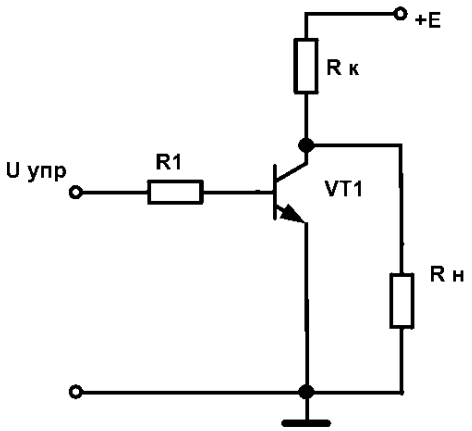


Рис. 19. Ключевой каскад ОЭ

1. Выбор соотношения между $R_н$ и $R_к$. При выборе надо учитывать, что чем больше $R_к$, тем больше необходимо напряжение питания для обеспечения заданного напряжения $U_н$ и тем меньше ток $I_к$ транзистора, что видно из уравнений:

$$U_н = \frac{E_{пит}}{R_к + R_н} \cdot R_н, \qquad I_н = \frac{E_{пит}}{R_к + R_н}.$$

2. Рассчитывается величина Rк и выбирается напряжение источника питания:

$$E_{пит} = I_н \cdot (R_к + R_н).$$

3. Рассчитывается ток коллектора

$$I_к = \frac{E_{пит}}{R_к}.$$

4. Исходя из соотношений:

$$U_{кэ\max} \geq U_н,$$
$$I_{к\max} \geq I_к,$$
$$P_{доп} \leq I_к \cdot U_{кэ\ нас} + P_{дин}$$

выбирается транзистор. Соотношение между $R_к$ и $R_н$ считается выбранным правильно, если мощность нагрузки сопоставима с мощностью выбранного транзистора. Если мощность транзистора больше, чем мощность нагрузки, то это соотношение надо поменять.

Дальнейший расчет каскада не отличается от рассмотренного ранее.

4.5.2.2. Расчет оконечного каскада ОК

Схема каскада представлена на Рис. 20. Данная схема обычно находит применение, когда мощность нагрузки не превышает 1 Вт. Это объясняется тем, что величина напряжения управления, которое необходимо подать на вход схемы, определяется в основном напряжением на нагрузке:

$$U_у = U_{эб} + U_н.$$

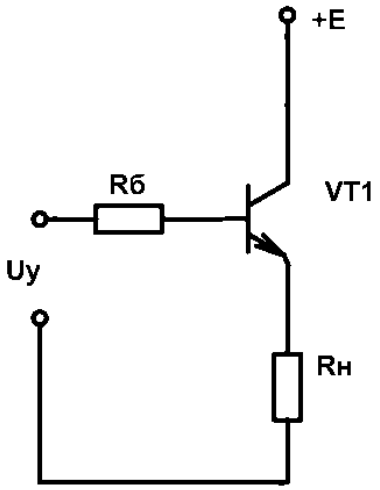


Рис. 20. Ключевой каскад ОК

Транзистор будет находиться в активном режиме, а следовательно потреблять значительную мощность, до тех пор, пока *Uy* не станет больше, чем $E_{пит}$ (т.к. $E_{пит} = U_{кэ} + U_н$), а это условие редко выполняется в реальных схемах. Наиболее часто схема применяется как усилитель тока на транзисторе, работающем в активном режиме.

Соотношения для выбора транзистора:

$$U_{кэ\max} \geq E_{пит},$$
$$I_{к\max} \geq I_н,$$
$$P_{доп} \leq I_н \cdot U_{кэ}.$$

Базовый ток транзистора определяется из соотношения: $I_б = I_к / \beta$, заметим, что в этом случае коэффициент $K_{нас}$ не применяется, т.к. транзистор работает в активном режиме.

Определение параметров источника управления:

$$U_y = R_б \cdot I_б + U_н + U_{бэ},$$
$$I_y = I_б.$$

Сопротивление $R_{бэ}$ выбирается в соответствии с рекомендациями (1).

4.5.2.3. Расчет оконечного каскада ОЭ на транзисторе с обратным типом проводимости

Схема каскада представлена на Рис. 21. Расчет этого каскада не отличается от расчета каскада с изолированной нагрузкой. Изменяется только выбор напряжения источника управления:

$$U_y = E_{пит} - U_{бэ} - R_{бэ} \cdot I_б.$$

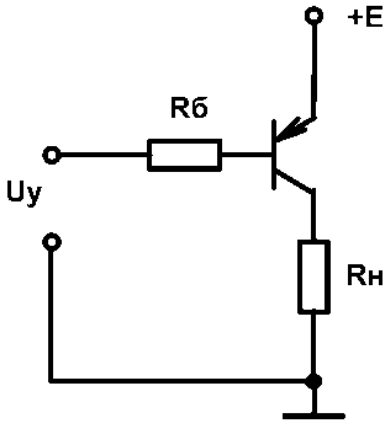


Рис. 21. Каскад ОЭ на транзисторе с обратным типом проводимости

4.5.3. Особенности расчета усилителей с форсирующим конденсатором

Часто для увеличения быстродействия ключевого усилителя применяются форсирующие звенья, которые уменьшают времена включения и выключения транзистора. Пример такого усилителя представлен на Рис. 22.

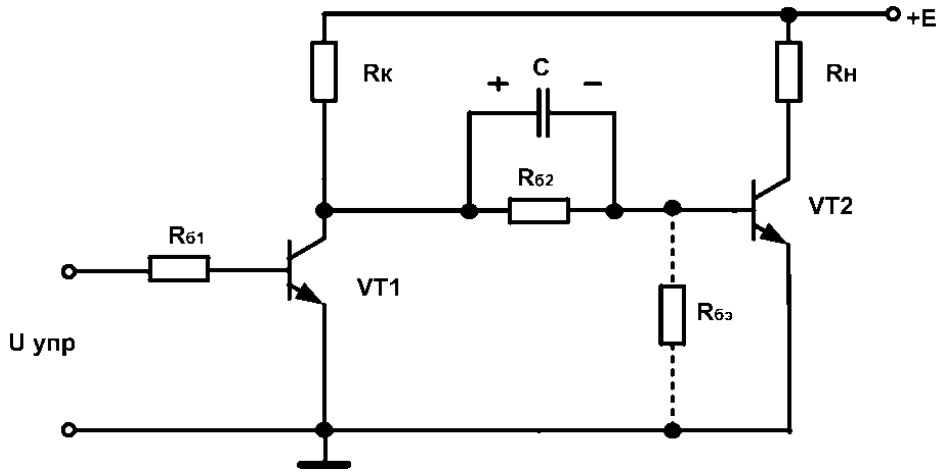


Рис. 22. Ключевой усилитель с форсирующим конденсатором

При расчете такого усилителя следует помнить, что в начальный момент времени, когда транзистор *VT*1 закрывается, базовый ток транзистора *VT*2 ограничивается только резистором $R_к$, т.к. напряжение на конденсаторе равно нулю:

$$I_{бнач} = \frac{E - U_{бэ}}{R_к}.$$

Резистор $R_к$ следует выбирать таким образом, чтобы в начальный момент $I_б$ не превысил $I_{б\max}$ (параметр транзистора):

$$R_к \geq \frac{E - U_{бэ}}{I_{б\max}}.$$

По мере заряда конденсатора базовый ток транзистора *VT*2 падает и после окончания переходного процесса достигает номинальной величины:

$$I_б = \frac{E - U_{бэ}}{R_к + R_{б2}}.$$

При этом конденсатор заряжается до напряжения:

$$U_c = \frac{E - U_{бэ}}{R_к + R_{б2}} \cdot R_{б2}.$$

В момент открывания транзистора *VT*1, левая обкладка конденсатора *C* через открытый транзистор оказывается на общем выводе, а правая минусом прикладывается к базе, в результате этого транзистор *VT*2 быстро закрывается за счет напряжения U_c, приложенного к переходу база-эмиттер, при этом может

случиться, что оно превысит максимально допустимое запирающее напряжение $U_{эб}$ (параметр транзистора), что в свою очередь приведет к выходу из строя транзистора.

Исходя из вышеизложенного, рекомендуется следующий порядок расчета резисторов усилителя:

1. Рассчитывается резистор Rб2:

$$R_{б2} \le \frac{U_{эб}}{I_{б2}};$$

2. Проверяется выполнение условия (1), если оно не выполняется, параллельно переходу база-эмиттер ставится дополнительный резистор. Рассчитывается ток через этот резистор:

$$I_{Rбэ} = \frac{U_{бэ}}{R_{бэ}},$$

Если этот ток не превышает 10% от базового тока, то его можно не учитывать. Если превышает, то при дальнейших расчетах в формулы вместо тока $I_б$ надо подставлять сумму токов $I_{Rбэ} + I_б$.

3. Рассчитывается резистор $R_к$:

$$R_к = \frac{E - U_{эб} - R_{б2} \cdot I_{б2}}{I_{б2}};$$

4. Проверяется выполнение условия, что начальный ток базы $VT2$ не превышает предельно допустимого:

$$I_{б\ нач} \le I_{б\max}.$$

Если это условие не выполняется, то надо выбрать $R_{б2}$ меньше, а $R_к$ больше и повторить расчеты.

4.6. Практическая работа 5. Стабилизаторы постоянного напряжения

Целью работы является экспериментальное исследование основных характеристик стабилизаторов постоянного напряжения с помощью системы моделирования электронных схем ASIMEC. В качестве схем исследования выбраны: параметрический стабилизатор и компенсационный стабилизатор непрерывного действия.

4.6.1. Способы регулирования напряжения и тока в устройствах преобразовательной техники

Стабилизаторы напряжения предназначены для автоматического поддержания напряжения на нагрузке при воздействии различных дестабилизирующих факторов:

изменение (нестабильность) входного напряжения, изменение сопротивления нагрузки, пульсации входного напряжения и т.п.

Основные параметры стабилизаторов, которые исследуются в данной практической работе:

1. Коэффициент стабилизации $K_{ст}$, равный отношению относительного приращения напряжения на входе стабилизатора к относительному приращению напряжения на выходе:

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} : \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}. \qquad (2)$$

2. Коэффициент полезного действия η (к.п.д.), определяемый отношением мощности выделенной на нагрузке к мощности потребляемой от источника питания стабилизатора:

$$\eta = \frac{P_н}{P_{вх}}. \qquad (3)$$

3. Выходное сопротивление стабилизатора $R_{вых}$, характеризующее изменение выходного напряжения к изменению выходного тока, при постоянном входном напряжении:

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_н}{\Delta I_н}. \qquad (4)$$

4. Нагрузочная характеристика стабилизатора, зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки или тока нагрузки при фиксированном входном напряжении.

4.6.2. Параметрические стабилизаторы

Параметрический стабилизатор (Рис. 23, *а*) поддерживает неизменным напряжение на нагрузке за счет нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового стабилитрона, имеющего участки неизменного напряжения от протекающего тока. Рабочая точка (см. Рис. 23, *в*) находится на обратной ветви ВАХ стабилитрона и задается балластным резистором $R_б$. При изменении входного напряжения на величину $\Delta U_{вх}$ изменяется ток через стабилитрон, но напряжение на стабилитроне, а значит напряжение на нагрузке, меняется незначительно.

Параметрические стабилизаторы как правило используются в качестве источников опорного напряжения или для питания слаботочных (до единиц миллиампер) нагрузок, в диапазоне напряжений от единиц до сотен вольт.

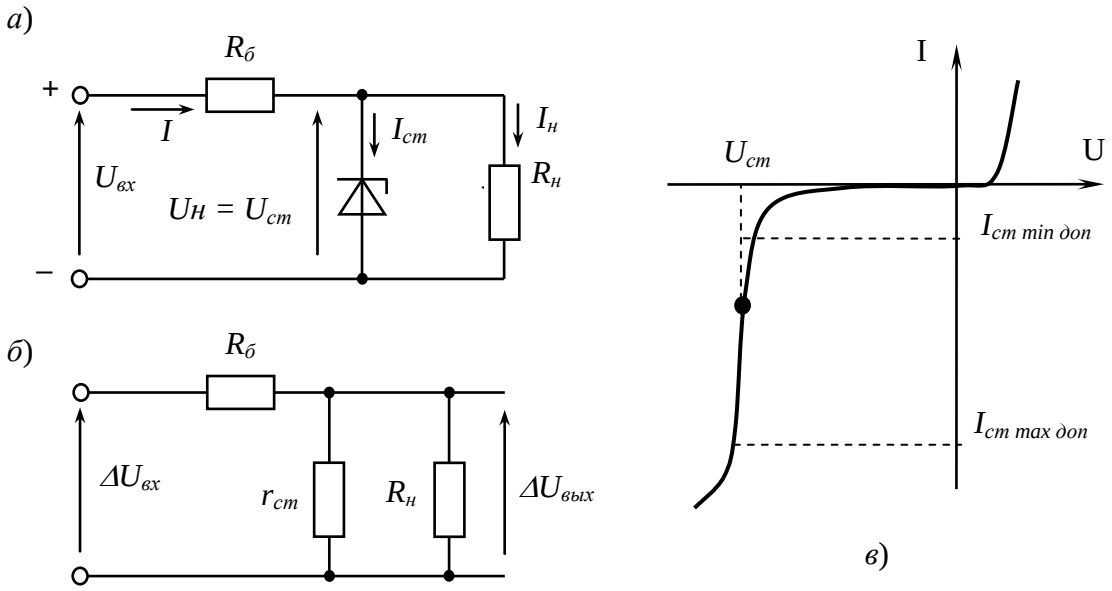


Рис. 23. Параметрический стабилизатор напряжения параллельного типа: электрическая схема (*а*); эквивалентная схема стабилизатора для приращений напряжений (*б*) ВАХ стабилитрона (*в*)

Расчет параметрического стабилизатора сводится к выбору стабилитрона на необходимое напряжение и расчету балластного резистора для задания рабочей точки стабилитрона. Величину сопротивления балластного резистора рассчитывают по выражению:

$$R_б = \frac{U_{вх\min} - U_н}{I_{ст\min} - I_{н\max}}.$$

Причем должны соблюдаться следующие условия:

$$I_{ст\min} = \frac{U_{вх\min} - U_н}{R_б} - I_{н\max} > I_{ст\min доп},$$

$$I_{ст\max} = \frac{U_{вх\max} - U_н}{R_б} - I_{н\min} < I_{ст\max доп},$$

где $I_{ст\min доп}$ и $I_{ст\max доп}$ – минимальное и максимальное допустимое значения токов конкретного стабилитрона.

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора равен:

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} : \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}} = \frac{R_б}{r_{ст}} \cdot \frac{U_н}{U_{вх}},$$

где $r_{ст}$ - динамическое сопротивление стабилитрона.

Выходное сопротивление (для рассматриваемой схемы оно определяется динамическим сопротивлением стабилитрона):

$$R_{вых} = \frac{\partial U_{вых}}{\partial I_н} \approx r_{ст}.$$

Достоинством параметрических стабилизаторов параллельного типа является простота конструкции и надежность в работе. Они не боятся коротких замыканий в нагрузке. К недостаткам следует отнести невысокий КПД (обычно не более 50%), небольшое значение коэффициента стабилизации (несколько десятков), относительно большое значение $R_{вых}$, а также узкий и нерегулируемый диапазон стабилизируемого напряжения.

4.6.3. Компенсационные стабилизаторы

Компенсационные стабилизаторы представляют собой систему автоматического регулирования, где регулирующее сопротивление $R_{упр}$ управляется внешним сигналом $U_{упр}$, полученным в результате сравнения выходного напряжения с источником опорного напряжения (ИОН).

Компенсационные стабилизаторы могут быть как последовательного, так и параллельного типа. В качестве ИОН в компенсационных стабилизаторах могут применяться параметрические стабилизаторы.

С учетом введения обратных связей структурная схема компенсационного стабилизатора последовательного типа принимает вид, представленный на Рис. 24. В элементе сравнения (ЭС) производится сравнение фактического значения выходного напряжения стабилизатора с его заданным значением, которое определяется ИОН. В зависимости от отклонения выходного напряжения к заданному значению, сигнал рассогласования на выходе элемента сравнения, усиленный усилителем (У), осуществляет такое воздействие на регулирующий элемент $R_{упр}$, при котором отклонение уменьшается и выходное напряжение приближается к заданному значению, т.е. стабилизируется.

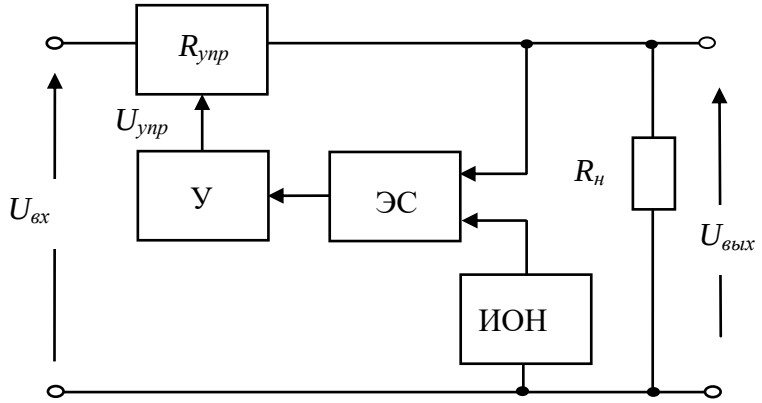


Рис. 24. Структурная схема последовательного компенсационного стабилизатора

Одна из простейших схем последовательного компенсационного стабилизатора представлена на Рис. 25.

Здесь транзистор *VT1* выполняет функцию регулируемого сопротивления, на управляющий вход которого (базу) поступает сигнал с транзистора *VT2*. В транзисторе *VT2* потенциал эмиттера стабилизирован с помощью параметрического стабилизатора (стабилитрон *VD1* вместе с резистором *R1* и конденсатором *C1*), а напряжение на базе является частью выходного напряжения.

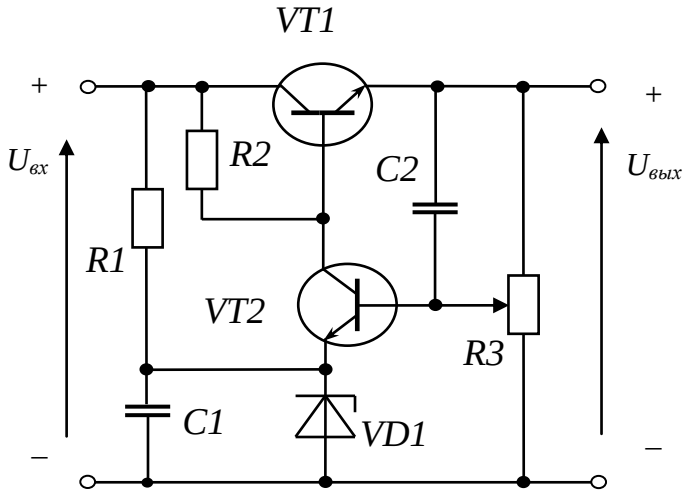


Рис. 25. Последовательный компенсационный стабилизатор

При этом, питание параметрического стабилизаторы может осуществляться как от источника выходного напряжения, так и с выхода стабилизатора.

Отклонение выходного напряжения от номинального изменяет исходное напряжение между базой и эмиттером транзистора *VT2*, что в свою очередь сказывается на величине базового и коллекторного токов этого транзистора. Коллекторной нагрузкой транзистора *VT2* является резистор *R2* и транзистор *VT1*. Изменение коллекторного тока транзистора *VT2* приводит к изменению потенциала коллектора *VT2* и соответственно базы *VT1*. Изменение потенциала базы *VT1*, в свою очередь, приведет к изменению сопротивления участка коллектор – эмиттер *VT1* и к изменению падения напряжения на нем.

Таким образом, в транзисторе *VT2* происходит сравнение эталонного напряжения с текущим значением выходного напряжения, т.е. выработка сигнала рассогласования и последующее его усиление.

В практической работе, меняя положение движка потенциометра *R3*, можно в определенных пределах менять величину номинального выходного напряжения.

Конденсатор *C2* обеспечивает увеличение быстродействия схемы по пульсациям.

В схемах, подобных рассмотренной, обеспечивается выходное сопротивление

порядка десятых долей [Ом], а коэффициент стабилизации – от нескольких десятков до нескольких сотен. Улучшение параметров достигается за счет усложнения схемы – использования операционных усилителей с большим коэффициентом усиления в петле обратной связи; использования составных транзисторов для увеличения коэффициентов передачи токов базы, входящих в систему транзисторов.

Недостатком стабилизаторов последовательного типа является то, что при токовых перегрузках или коротком замыкании на выходе, могут выходить из строя регулирующие транзисторы, поэтому в схемы стабилизаторов вводят специальные элементы защиты.

5. Принципы оценки успеваемости обучающихся

Таблица 6. Балльные оценки для элементов контроля

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
6 семестр				
Опрос на занятиях	3	4	3	10
Отчет по индивидуальному заданию	5	5	5	15
Отчет по лабораторной работе	5	5	5	15
Отчет по практическому занятию	5	5	5	15
Тест	5	5	5	15
Итого максимум за период	23	24	23	70
Экзамен				30
Нарастающим итогом	23	47	70	100

Пересчет баллов в оценки за контрольные точки представлен в таблице 7.

Таблица 7. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90% от максимальной суммы баллов на дату КТ	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60% от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку представлен в таблице 8.

Таблица 8. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Оценка (ГОС)	Итоговая сумма баллов, учитывает успешно сданный экзамен	Оценка (ECTS)
5 (отлично) (зачтено)	90 - 100	A (отлично)
4 (хорошо) (зачтено)	85 - 89	B (очень хорошо)
	75 - 84	C (хорошо)
	70 - 74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно) (зачтено)	65 - 69	
	60 - 64	E (посредственно)
2 (неудовлетворительно) (не зачтено)	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

6. Материально-техническое и программное обеспечение дисциплины

Материально-техническое и программное обеспечение для лекционных занятий

Для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации используется учебная аудитория с количеством посадочных мест не менее 22-24, оборудованная доской и стандартной учебной мебелью. Имеются демонстрационное оборудование и учебно-наглядные пособия, обеспечивающие тематические иллюстрации по лекционным разделам дисциплины.

Материально-техническое и программное обеспечение для практических занятий

Для проведения занятий используется Лаборатория электротехники и электроники – учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ)

Описание имеющегося оборудования:

– Персональные компьютеры – 12 шт.;
– Осциллограф АСК 1021 – 6 шт.;
– Генератор прямоугольных импульсов – 6 шт.;
– Источник питания 9В, 2А – 6 шт.;
– Лабораторные макеты по курсу «Аналоговая электроника» – 12 шт.;
– Лабораторные макеты по курсу «Схемотехника» – 16 шт.;
– Лабораторные макеты по курсу «Магнитные элементы электронных устройств» – 2 шт.;
– Комплект специализированной учебной мебели;
– Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:

– ASIMEC
– Far Manager
– Google Chrome
– LTspice 4
– LibreOffice
– Mozilla Firefox
– PTC Mathcad13, 14
– Windows XP Pro

Материально-техническое и программное обеспечение для лабораторных работ

Для проведения занятий используется Лаборатория электротехники и электроники – учебная аудитория для проведения занятий практического типа,

учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ)

Описание имеющегося оборудования:
– Персональные компьютеры – 12 шт.;
– Осциллограф АСК 1021 – 6 шт.;
– Генератор прямоугольных импульсов – 6 шт.;
– Источник питания 9В, 2А – 6 шт.;
– Лабораторные макеты по курсу «Аналоговая электроника» – 12 шт.;
– Лабораторные макеты по курсу «Схемотехника» – 16 шт.;
– Лабораторные макеты по курсу «Магнитные элементы электронных устройств» – 2 шт.;
– Комплект специализированной учебной мебели;
– Рабочее место преподавателя.
Программное обеспечение:
– ASIMEC
– Far Manager
– Google Chrome
– LTspice 4
– LibreOffice
– Mozilla Firefox
– PTC Mathcad13, 14
– Windows XP Pro

Материально-техническое и программное обеспечение для самостоятельной работы

Для самостоятельной работы используются учебные аудитории (компьютерные классы) кафедры ПрЭ ТУСУР
Состав оборудования:
– учебная мебель;
– компьютеры класса не ниже ПЭВМ INTEL Celeron D336 2.8ГГц.;
– компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.
Перечень программного обеспечения:
Microsoft Windows;
OpenOffice;
Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
7-Zip;
Google Chrome.

7. Содержание оценочных материалов и методические рекомендации

Для оценки степени сформированности и уровня освоения закрепленных за дисциплиной компетенций используются оценочные материалы в составе:

Темы для опросов на занятиях:

Импульс. Импульсная последовательность. Частота, скважность, относительная длительность. RC и LR цепи в импульсных устройствах. Переходные процессы, апериодические звенья.

Ключ с ОЭ. Ключ звезда. Процессы в биполярном транзисторе в режиме ключа. Насыщение транзистора. Многокаскадные усилители класса D и методика их расчетов. Устройства на полупроводниковых приборах с S и N характеристиками. Элементы с отрицательным сопротивлением. Однопереходный транзистор и его применение. Варианты схем на ОПТ, методики расчета.

Основные параметры цифровых интегральных схем. Триггер Шмидта и RS-триггер на дискретных элементах; варианты схем управления. Триггер с эммитерной связью. Формирование логических уровней RS- триггер на дискретных элементах. Варианты схем управления. Методика проектирования.

Заторможенные и автоколебательные мультивибраторы. Ждущий мультивибратор на биполярных транзисторах. Принцип действия, методика расчета Варианты схем автоколебательных мультивибраторов. Мультивибраторы с трансформаторной связью и блокинг-генераторы. Режимы работы. Варианты схем, методика расчета.

Интегральный таймер и его применение. Однотактный таймер 1006ВИ1. Синтез сигналов специальной формы на базе ЦАП. Матрицы ЗУ, преобразование кода в напряжение.

Схемотехнические решения, принцип действия и методики расчета.

ШИМ преобразователь. Схемотехнические решения, принцип действия и методики расчета. Источники питания на основе ключевых схем. Формирование алгоритмов управления ключевыми источниками питания.

Темы индивидуальных заданий:

1. Триггер- формирователь;
2. Ключевые устройства;
3. Симметричный мультивибратор на биполярных транзисторах с зарядом конденсатора;
4. ГЛИН нарастающего типа с RC-цепью;
5. Триггер Шмидта;
6. ГЛИН нарастающего типа с токовым зеркалом в качестве источника тока;
7. Симметричный мультивибратор на ОУ.
8. Классический мультивибратор Ройера;
9. Двоично-десятичная взвешенная(1-2-4-8) матрица на 12 разрядов;
10. Матрица R-2R 4 разряда на основе токового сумматора;
11. Устройства на полупроводниковых приборах с S и N характеристиками;
12. ШИМ преобразователь, принцип действия и методики расчета.

Вопросы для подготовки к практическим занятиям, семинарам

Переходные процессы в ключевых устройствах. Процессы в биполярном транзисторе в режиме ключа. Насыщение транзистора.

ГЛИН, принцип действия, математическая модель, методики расчета, реализация на аналоговых элементах

Источники питания на основе ключевых схем. ШИМ. Формирование алгоритмов управления ключевыми источниками питания на основе аналоговых цепей. Математическое описание

Импульс. Импульсная последовательность. Частота, скважность, относительная длительность. Переходные процессы, апериодические звенья.

Формирование логических уровней RS- триггер на дискретных элементах. Варианты схем управления.

Интегральный таймер и его применение. Матрицы ЗУ, преобразование кода в напряжение.

Варианты схем автоколебательных мультивибраторов. Мультивибраторы с трансформаторной связью и блокинг-генераторы.

Темы лабораторных работ

Ключевые устройства, разновидности ключей, переходные процессы в ключевых устройствах (Электронный ключ).

Генераторы линейно нарастающего напряжения (ГЛИН). RC-цепи в импульсных устройствах (Формирующие цепи)

Генерация импульсной последовательности. Частота, скважность, относительная длительность. Измерение высокочастотных сигналов

Триггер- формирователь (триггер Шмидта). Ждущий мультивибратор на биполярных транзисторах. Принцип действия, методика расчета, варианты схем.

Экзаменационные вопросы

1. АЦП – параллельного типа.
2. АЦП – последовательного типа.
3. АЦП – следящего типа.
4. АЦП – двойного интегрирования.
5. Матричные АЦП.
6. Безматричные АЦП.
7. ЦАП с двоично взвешенными резисторами.
8. ЦАП с матрицей типа R - 2R.
9. ЦАП безматричного типа.
10. Коды применяемые в ЦАП и АЦП.
11. Элементы и узлы, влияющие на точность АЦП двойного интегрирования.
12. Элементы, влияющие на точность АЦП параллельного типа.
13. Транзисторный ключ. Свойства, схемы включения, методика расчета.
14. Генератор линейно нарастающего напряжения. Принцип действия и методика расчета.
15. Принцип работы ОПТ и методика расчета мультивибратора на ОПТ.
16. ГЛИН со стабилизатором тока заряда. Принцип действия, методика

расчета.

17. ГЛИН со стабилизатором тока разряда. Принцип действия, методика расчета.

18. Генераторы линейного изменяющегося напряжения со стабилизаторами тока.

19. Несимметричный триггер. Принцип действия, медика расчета.

20. Методика расчета 2-х каскадных ключевых усилителей (базовые цепи с форсирующими RC цепями).

21. Блокинг генератор в автоколебательном режиме.

22. Генератор линейно падающего напряжения. Принцип действия, методика расчета.

23. Ждущий мультивибратор на биполярных транзисторах. Принцип действия, методика расчета.

24.Автоколебательный мультивибратор. Принцип действия, методика расчета

Литература

Основная литература

1. Герасимов В.М., Скворцов В.А. Электронные цепи и микросхемотехника. Часть 2. Схемотехника ключевых устройств формирования и преобразования сигналов: Уч. пособие. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2004 – 209 с. ISBN 5-86889-118-X (Ч.2) ISBN 5-86889-116-3

2. Учебное пособие «Микросхемотехника. Аналоговая микросхемотехника» [Электронный ресурс] : для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н. С., Четвергов К. В. - 2014. 238 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://edu.tusur.ru/publications/4289

Дополнительная литература

1. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебное пособие для вузов / В. Н. Павлов. - М. : Академия, 2008. - 287, [1] с. : ил., табл. - (Высшее профессиональное образование. Радиотехника) (Учебное пособие). - Библиогр.: с. 284. - ISBN 978-5-7695-2702-9 (наличие в библиотеке ТУСУР - 26 экз.)

2. Электронные цепи и микросхемотехника : Учебник для вузов / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. - М. : Высшая школа, 2002. - 384 с. : ил. - Библиогр.: с. 382. - ISBN 5-06-004040-2 (в пер.) (наличие в библиотеке ТУСУР - 101 экз.)

3. Основные схемотехнические структуры цифровой интегральной микроэлектроники: Презентация / Легостаев Н. С. - 2015. 27 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://edu.tusur.ru/publications/5585

4. Классификация интегральных микросхем. Система обозначений интегральных микросхем: Презентация / Легостаев Н. С. - 2015. 30 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://edu.tusur.ru/publications/5579

Учебно-методические пособия

1. Топор А.В. Схемотехника. Лабораторный практикум / А.В. Топор, А.В. Бахмет; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 55 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 50., скачать которое можно по ссылке с сайта кафедры: http://ie.tusur.ru/docs/new/lab/st/l_st.pdf

2. Воронин А.И. Схемотехника. Учебно-методическое пособие для проведения практических работ / А.И. Воронин, Ю.Н. Тановицкий, А.В. Топор; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 71 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 54.

3. Легостаев Н.С. Микросхемотехника. Руководство к организации самостоятельной работы для студентов специальности 210104.65 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» / Н.С. Легостаев, К.В.Четвергов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 46 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.ie.tusur.ru/docs/lns/mst.zip

4. Башкиров В. Н., Орлов А. А. Лабораторный практикум по дисциплине «Микросхемотехника» / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники. - Томск : ТУСУР, 2018. - 23 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://ie.tusur.ru/docs/new/lab/mst/l_mst.pdf

5. Схемотехника: Методические указания для проведения практических занятий / Масалов Е. В., Озеркин Д. В. - 2011. 22 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://edu.tusur.ru/publications/1200

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. Патентная база РФ по топологиям интегральных схем: http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/

Михальченко С.Г., Скворцов В.А
Схемотехника. Учебно-методическое пособие по самостоятельной работе студентов / С.Г. Михальченко, В.А. Скворцов; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 58 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 56.

© Михальченко С.Г., 2018
© Скворцов В.А., 2018
© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018