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 для проведения практических работ

Разработчики:

Доцент каф.ПрЭ

А.И. Воронин

Доцент каф. ПрЭ

Ю.Н. Тановицкий

ст. преподаватель каф. ПрЭ

А.В. Топор

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.

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.

[©] Воронин А.И., 2018

[©] Тановицкий Ю.Н., 2018

[©] Топор А.В., 2018

[©] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018

Содержание

Co	держан	ие	3		
1.	Систем	па моделирования электронных схем ASIMEC	4		
2.	Исслед	ование цифроаналоговых преобразователей	8		
	2.1.	Теоретические сведения о ЦАП.			
	2.2.	Практическая работа 1. «Исследование цифроаналоговых			
	прео	бразователей»	17		
3.	Исследование автоколебательного блокинг-генератора				
	3.1.	Мультивибратор с трансформаторной связью	21		
	3.2.	Расчет автоколебательного блокинг-генератора			
	3.3.	Практическая работа 2. «Исследование автоколебательного блокинг-			
	генер	ратора»	25		
4.	Исслед	ование ждущего блокинг-генератора	28		
	4.1.	Мультивибратор с трансформаторной нагрузкой и положительной обрат	ной		
	связы	Ю			
	4.2.	Расчет ждущего блокинг-генератора			
	4.3.	Практическая работа 3. «Исследование ждущего блокинг-генератора»	33		
5.	Расчет многокаскадных ключевых усилителей на биполярных транзисторах 35				
	5.1.	Расчет оконечного ключевого каскада с изолированной нагрузкой			
	5.2.	Расчет оконечных каскадов с нагрузкой, подключенной к общему вывод			
	5.3.	Особенности расчета усилителей с форсирующим конденсатором			
	5.4.	Практическая работа 4. «Расчет усилительного каскада»	42		
6.	Стабил	изаторы постоянного напряжения	44		
	6.1.	Способы регулирования напряжения и тока в устройствах			
		бразовательной техники			
	6.2.	Параметрические стабилизаторы			
	6.3.	Компенсационные стабилизаторы			
	6.4.	Практическая работа 5. «Исследование стабилизатора напряжения»	49		
Сп	исок ли	тературы	54		
П		ма	56		

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 От из главного меню Φ айл, запустить процесс моделирования (кнопка А нализ), 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. 1).

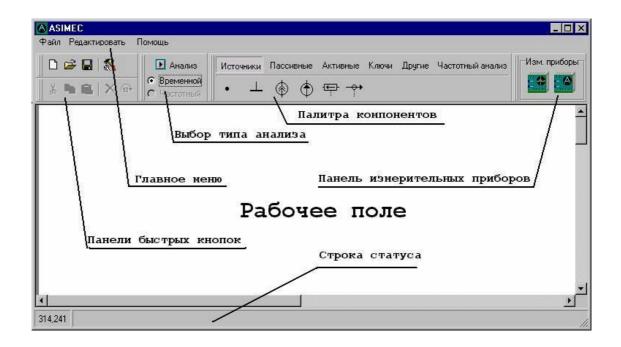


Рис. 1. Рабочее окно ASIMEC

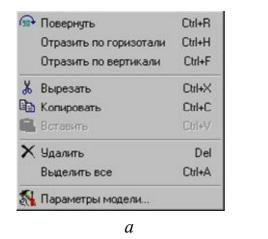
В верхней части окна ASIMEC вы видите *полосу главного меню*. Элементы главного меню предоставляют возможность вызывать все основные команды. Ниже полосы главного меню расположены *инструментальные панели*. На левой панели друг под другом находятся

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. 2).



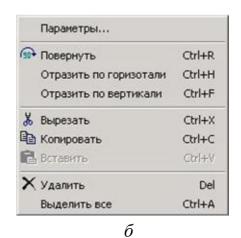


Рис. 2. Раздел «Редактировать» главного меню (a) и всплывающее меню (δ)

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. 3).

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.

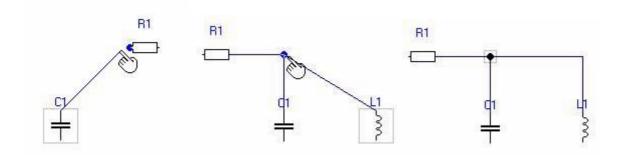


Рис. 3. Работа с компонентами и проводниками

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.

2. Исследование цифроаналоговых преобразователей

2.1. Теоретические сведения о ЦАП

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 аналогового входного сигнала, такой ЦАП числа называется перемножающим. Полярность произведения зависит от полярности сигнала, цифровой аналогового системы кодирования И характера Если ЦАП преобразования. воспринимает опорные сигналы положительной, так И отрицательной полярности цифровой сигнал биполярный, происходит четырехквадрантное умножение.

2.1.1. 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 MP (LR) — это цифра, которая имеет наименьшую величины или вес. Единица MP по отношению к полной шкале определяет разрешающую способность цифрового числа.

Старший разряд CP (MR) — эта цифра (или разряд), которая имеет наибольшую величину или вес. CP, 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.

2.1.2. ЦАП на базе двоично-взвешенных резисторов

Цап на базе двоично-взвешенных резисторов состоит из матрицы двоично-взвешенных резисторов, N переключателей на каждый разряд, управляемых цифровыми сигналами, источника опорного напряжения U_{on} и суммирующего элемента (Рис. 4). Функцию суммирующего элемента выполняет операционный усилитель (ОУ) в инвертирующем включении, для которого вся матрица резисторов может быть представлена одним выходным резистором. ОУ обеспечивает нулевой потенциал на выходе матрицы резисторов (инвертирующем входе ОУ) независимо от состояния переключателей S1-S4.

К примеру, при замыкании ключа S4 ток от источника опорного напряжения поступает на вход ОУ, при этом величина тока определяется как U_{on}/R . Если замкнуть ключ S3, то ток I_3 будет в два раза меньше. Из этого следует, что ключ S4 является ключом старшего разряда, а ключ S1 — младшего. При одновременном замыкании ключей суммарный ток I_{Σ} будет равен сумме токов от замкнутых ключей $I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$.

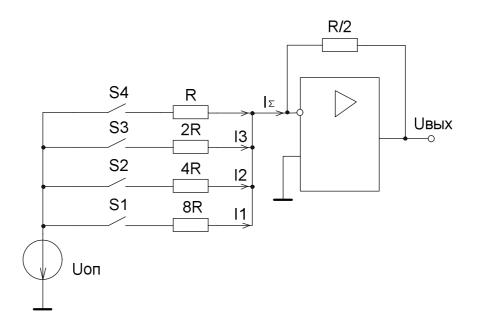


Рис. 4. ЦАП на базе двоично-взвешенных резисторов

В практических схемах в качестве резистора обратной связи «инвертирующего сумматора» устанавливает резистор, обеспечивающий при подключении старшего разряда $0.5\,U_{on}$ на выходе. При одновременном замыкании ключей в ЦАП такого типа напряжение на выходе ОУ равно:

$$U_{\text{Bblx}} = U_{n.uu} = \frac{N}{2^n} \cdot U_{on},$$

Где $N=2^n-1$ — максимальное число для кодовой комбинации ЦАП; $U_{on}/2^n$ — все единицы младшего разряда.

2.1.3. ЦАП на базе резистивной матрицы типа R-2R

Преобразователи на резистивных матриц R-2R основе типа сравнительно просты для изготовления, потому что в них используются только два значения сопротивлений: *R* и 2*R*. Сопротивления можно выбирать из большой группы резисторов, исключив технологический разброс, так как важны лишь их относительные значения. Более того, поскольку точный подбор наиболее важен для резисторов, образующих старшие разряды, резисторы младших разрядов, выбор которых менее критичен, могут иметь допуски без снижения общей точности преобразователя. широкие Отношение значений сопротивлений должно сохраняться и при работе преобразователя в рабочем диапазоне температур; если необходимо подбирать температурные коэффициенты, то резисторы R и 2R должны быть одного и того же типа. Иногда резистор 2R составляют из двух последовательно соединенных резисторов R, что позволяет применять одни и те же резисторы для всей многозвенной цепочки. Хотя это и увеличивает число элементов, однако упрощает подбор величин и температурных коэффициентов.

Выходное сопротивление R-2R-цепочки — постоянная величина, не зависящая от положения ключей. Таким образом, фиксированная резистивная нагрузка не вносит нелинейных ошибок. Причем, следует отметить, что при различных кодовых состояниях матрицы ее выходное сопротивление остается неизменным и равно R.

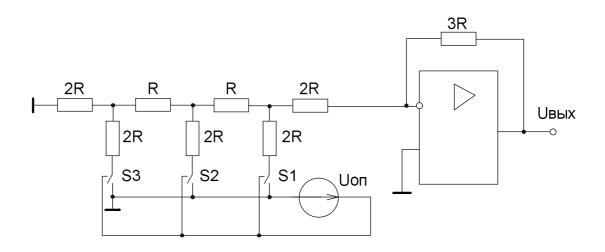


Рис. 5. ЦАП на резистивной матрице R-2R с выходом по току

В схеме ЦАП на резистивной матрице типа R-2R с выходом по току (Рис. 5) двоичное деление ключей S1, S2, S3 осуществляется с помощью последовательного деления тока между шунтирующими резисторами с сопротивлением 2R и последовательно с ними включенными ветвями цепочки резисторов с сопротивлением R. При этом токи в ветвях такой цепочки резисторов удовлетворяют двоичному соотношению и вклад каждого разряда в выходной сигнал пропорционален его двоичному весу. Цепочка резистора R-2R нагружена на согласующий резистор 2R, который является входным для инвертирующего ОУ. Для получения на выходе ОУ напряжения, равного $U_{on}/2$ при включении старшего разряда, на ОУ установлен коэффициент передачи K = -3/2.

2.1.4. Устройство коммутации

В качестве устройства коммутации в схемах ЦАП на базе матрицы R-2R используется электронный перекидной ключ (Рис. 6). Изначально, данный компонент в элементной базе ASIMEC не предусмотрен, что потребовало его создание из имеющихся в данном программном продукте.

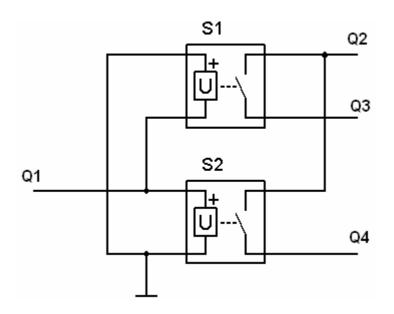


Рис. 6. Функциональная схема перекидного электронного ключа

За основу были взяты два обычных электронных ключа (Рис. 6). В качестве внутренних параметров ключи имеют уровень управляющего напряжения для режима включения (von) и для режима выключения (voff). Если ключу S1 задать параметры von = -1, voff = -0.01, а ключу S2 -von = 1, voff = 0.01 и соединить их, как показано на рисунке, то получим электронный управляемый перекидной ключ. Условно графическое обозначение ключа представлено на рисунке (Рис. 7).

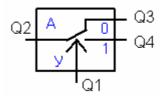


Рис. 7. УГО перекидного электронного ключа

Выводы полученного ключа соответствуют следующим функциям:

- Q1 вывод для подачи управляющего сигнала с системы управления (счетчика);
- Q2 вывод, подводимый к аналоговой схеме;
- Q3 ключ замыкается в положение 0 при подаче отрицательного управляющего импульса;
- Q4 ключ замыкается в положение 1 при подаче положительного управляющего импульса.

2.1.5. Система управления

В качестве системы управления ключами используется четырехразрядный асинхронный двоичный счетчик, тактируемый по переднему фронту, собранный на основе D-триггеров с RS входами (Рис. 8, 9).

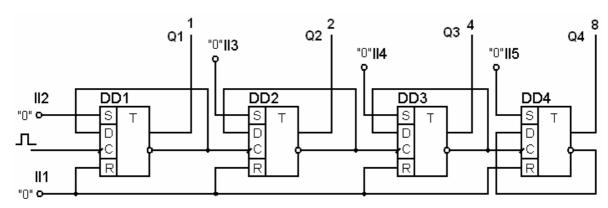


Рис. 8. Функциональная схема счетчика

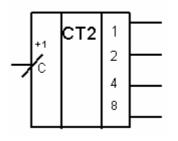


Рис. 9. УГО счетчика

Принцип работы счетчика следующий. Пусть в начальный момент состояния выходов счетчика соответствует двоичному числу 0000. При поступлении первого тактового импульса на синхронизирующий вход С триггера DD1 (Рис. 8) этот триггер переключается в состояние, соответствующее числу 0001.

Второй тактовый импульс возвращает триггер DD1 в исходное состояние 0 (Q=0), что стимулирует переключение триггера DD2 в состояние 1 (Q = 1). На индикаторе появится число 0010. Сигнал с инверсного выхода предыдущего триггера является входным сигналом для последующего и, таким образом, комбинация сигналов на выходах Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 будет соответствовать числу поступивших на вход счетчика импульсов, представленному в двоичном коде (Рис. 10).

Срез сигнала на выходе предыдущего триггера запускает следующий триггер. Триггер DD1, переключается с приходом каждого такого импульса, триггер DD2 переключается в два раза реже триггера DD1 и т.д.

Тактовые импульсы запускают только триггер DD1, который в свою очередь запускает триггер DD2, триггер DD2 соответственно, DD3 и т. д. Изменение состояния последовательно распространяется по цепочке триггеров, и такие счетчики называются счетчиками со сквозным переносом или асинхронными счетчиками.

Таким образом, на вход счетчика подается сигнал с генератора импульсов с заданным периодом повторения. С выходов счетчика Q_1 - Q_4 подается управляющий сигнал на ключи таким образом, что выход Q_1 приходится на ключ старшего разряда ЦАП.

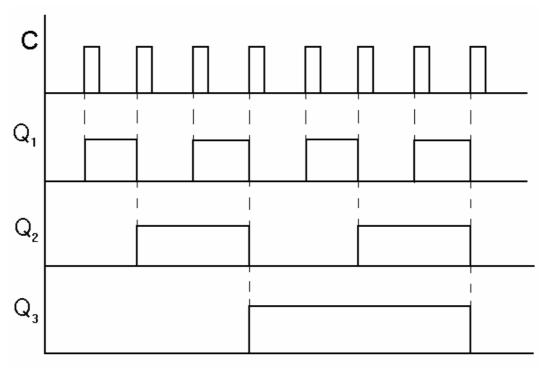


Рис. 10. Эпюры сигналов на выходах счетчика

С помощью генератора задающих импульсов, на вход счетчика подается последовательность импульсов с амплитудой 5 В и периодом повторения 20 мкс.

2.1.6. Блок пошагового управления

В рассмотренных выше случаях, система управления была настроена на автоматическую непрерывную работу, т.е. каждое переключение ключей соответствовало приходу нового импульса с задающего генератора. Практическую важность при изучении работы схем цифроаналоговых преобразователей дает возможность управлять задающими импульсами в пошаговом режиме. Для этого случаю предусмотрен блок, приведенный на схеме (Рис. 11).

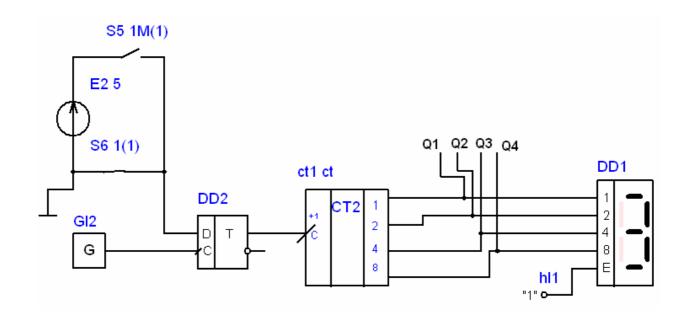


Рис. 11. Блок управления пошаговым режимом

Данный блок состоит из D-триггера, источника напряжения E2 и двух ключей S5 и S6, которые работают в противофазе, переключаясь посредством нажатия клавиши клавиатуры 1. По сути, эти два ключа представляют собой перекидной ключ с ручным управлением. На вход синхронизации триггера С подается последовательность импульсов с задающего генератора. На вход D, при замкнутом ключе S5, подается логическая единица, которая далее подается на вход счетчика, замыкая ключи в схеме ЦАП в соответствии с поданным двоичным кодом. Чтобы подать импульс для следующего переключения счетчика, необходимо нажать

клавишу 1 два раза, т.е. сбросить триггер в ноль и опять подать на него единицу. Таким образом, счетчик последовательно перебирает кодовые комбинации в двоичном коде от 0000 до 1111, которые отображаются на семисегментном индикаторе в шестнадцатиричном счислении от 0 до F. На рисунке показания индикатора соответствуют двоичному коду 0011, который подается на управление ключами ЦАП (Q1-Q4). При этом Q1 соответствует младшему разряду, а Q4 – старшему.

2.1.7. Элементная база исследуемых схем

Схемы цифроаналоговых преобразователей состоят из электронных перекидных ключей, резисторов и операционного усилителя (DA1). В выбран четырехразрядный качестве системы управления двоичный асинхронный счетчик. На вход счетчика подается серия импульсов с цифрового генератора импульсов (Gl1). Блок пошагового управления содержит источник питания, триггер и два ключа ручного управления, работающие в противофазе (S5, S6). Управление пошаговым режимом осуществляется путем последовательного двойного нажатия клавиши «1» клавиатуры. Для перевода схемы из автоматического в пошаговый режим управления и обратно также используются два ключа, работающие в противофазе (S7, S8). Поскольку схема состоит как из цифровых, так и из аналоговых компонентов, в схеме присутствуют блоки согласования (Рис. 12), которые преобразуют цифровой сигнал в аналоговый (ЦАП) или аналоговый в цифровой (АЦП). Эти блоки необходимо помещать между цифровыми и аналоговыми компонентами.

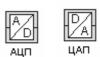


Рис. 12. Блоки согласования

Поскольку осциллограф способен принимать только аналоговые сигналы, то между ним и генератором импульсов присутствует блок ЦАП.

2.2. 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.

2.2.1. Двоично-взвешенные резисторы

- 2.2.1.1. Открыть в ASIMEC файл *ЦАП.сіг* для изучения ЦАП на матрице двоично-взвешенных резисторов (Рис. 13).
- 2.2.1.2. Согласно заданию преподавателя ввести значения весовых резисторов и резистора обратной связи, которые содержит Таблица 3 (Приложение 1).

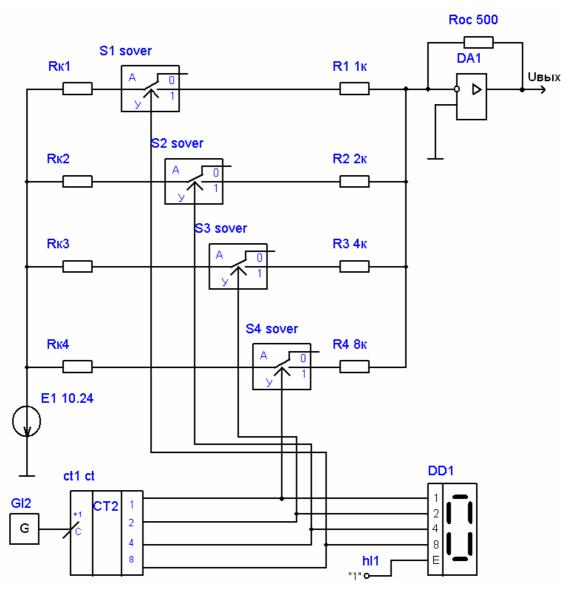


Рис. 13. ЦАП на матрице двоично-взвешенных резисторов

- 2.2.1.3. Рассчитать максимальный уровень напряжения на выходе (Рис. 13) и вес единицы младшего разряда. Проверить расчеты практически с помощью электронного осциллографа в пошаговом и циклическом режимах.
- 2.2.1.4. Присвоить разрядным резисторам удвоенное значение. Посмотреть, как меняются параметры схемы.
- 2.2.1.5. Рассчитать максимальный уровень выходного напряжения, если на цифровом индикаторе отражается значении столбца D (Таблица 3) при учете резистора обратной связи. Подключив блок пошагового управления (Рис. 14), подтвердить рассчитанное значение практически.
- 2.2.1.6. Ввести 10% отклонение на весовом резисторе R3. Просмотреть в пошаговом и циклическом режимах выходное напряжение и объяснить произошедшие изменения.
- 2.2.1.7. Ввести значение сопротивления ключа (Таблица 3) поочередно по каждому разряду. Определить в каком весовом разряде наибольшее влияние оказывает сопротивление ключа.
- 2.2.1.8. Повторить п. 2.2.1.7 с удвоенными значениями разрядных резисторов.
- 2.2.1.9. Рассчитать резистор обратной связи для нормализации выходного напряжения ЦАП. Выставив его, получить требуемое выходное значение.

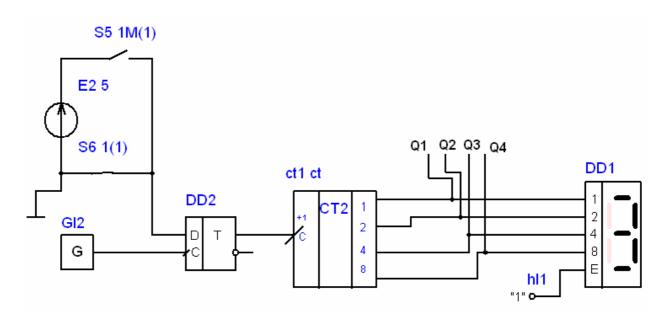


Рис. 14. Блок управления пошаговым режимом

2.2.2. Матрицы R-2R

- 2.2.2.1. Открыть в Asimec файл *ЦАП-R2R.cir* для изучения ЦАП на базе матрицы R-2R (Puc. 15).
- 2.2.2.2. Согласно заданию преподавателя ввести значения весовых резисторов и резистора обратной связи (Таблица 4, см. Приложение 1).
- 2.2.2.3. Рассчитать максимальный уровень выходного напряжения в точках Uвых1 и Uвых2 (Рис. 15) и вес единицы младшего разряда. Проверить расчеты с помощью электронного осциллографа.
- 2.2.2.4. Присвоить разрядным резисторам удвоенное значение. Посмотреть, как меняются параметры схемы.
- 2.2.2.5. Рассчитать максимальный уровень выходного напряжения в двух точках, если на цифровом индикаторе отражается значении столбца D1 (Таблица 4) при учете резистора обратной связи. Подключив блок пошагового управления (Рис. 14), подтвердить рассчитанное значение практически.

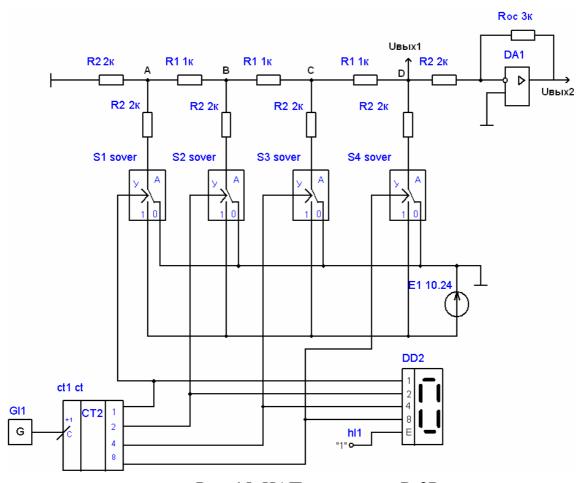


Рис. 15. ЦАП на матрице R-2R

- 2.2.2.6. В пошаговом режиме установить значение кода столбца D2 (Таблица 4) и просмотреть напряжения на узлах A-D и на выходе ЦАП.
- 2.2.2.7. Рассчитать резистор обратной связи для нормализации выходного напряжения ЦАП. Выставив его, получить требуемое выходное значение.

Подготовить отчет по проделанной практической работе, содержащий схемы исследуемых устройств, диаграммы выходного напряжения, необходимые расчеты, выводы по каждому эксперименту. При проведении экспериментов использовать необходимые измерительные приборы, результаты экспериментов представить в табличном виде.

Примечание: Перевод системы из автоматического в пошаговое управление и обратно осуществляется путем переключения ключей S7, S8 посредством нажатия клавиши «2» клавиатуры. Для возможности управления пошаговым режимом, необходимо после запуска осциллографа активировать окно, содержащее схему, путем щелчка мыши по области окна.

3. Исследование автоколебательного блокинг-генератора

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.

3.1. Мультивибратор 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 блокинг-генератор может работать генератор, ждущем И автоколебательном режимах. В данной работе предлагается исследовать блокинг-генератор, работающий В автоколебательном режиме. Принципиальная схема автоколебательного блокинг-генератора приведена на Рис. 16, а.

Автоколебательный режим обеспечивается подачей положительного напряжения от источника E_{Π} 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 $I_6 = \frac{U_{W3}}{R_6}$, однако по мере перезаряда величина тока уменьшается и в определенный момент, когда ток базы достигнет своего конечного значения $I_{\delta_\kappa} \leq \frac{I_\kappa}{\beta}$, процесс перезаряда закончится и напряжение на конденсаторе достигнет величины

 $U_{C_{\kappa}}$. 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.

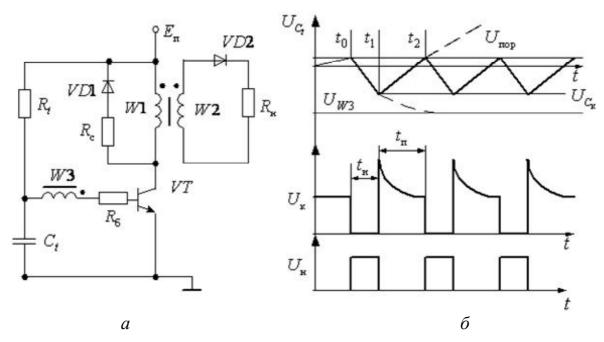


Рис. 16. Автоколебательный блокинг-генератор (a), временные диаграммы его работы (δ)

В течение времени восстановления транзистор находится в режиме отсечки. В это время происходит заряд конденсатора по цепи резистор R_t - источник E_{π} .

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

$$t_{\text{M}} = (t_1 - t_0) = R_6 C_t \ln \frac{U_{W3} + U_{\text{nop}}}{U_{W3} - U_{C_{\kappa}}},$$

где $U_{C_{\kappa}} = U_{W3} - U_{\text{пор}} - I_{\delta\kappa} R_{\delta};$

$$t_{\Pi} = (t_2 - t_1) = R_t C_t \ln \frac{E_{\Pi} + U_{C_{\kappa}}}{E_{\Pi} - U_{\Pi \text{op}}}.$$

Одновременно с зарядом конденсатора проходит сброс энергии сердечника на резистор $R_{\rm c}$. 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 $U_{\rm nop}$, транзистор открывается и процессы повторяются.

3.2. Расчет автоколебательного блокинг-генератора

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

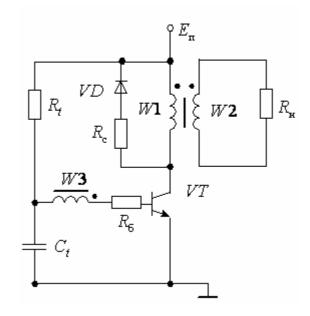


Рис. 17. Автоколебательный блокинг-генератор с времязадающей цепью

В макете используются транзистор КТ3102А с параметрами:

$$I_{\kappa max} = 100 \text{ MA};$$

 $U_{\kappa 9} = 50 \text{ B};$
 $U_{nop} = 0,5 \text{ B};$

и генератор прямоугольных импульсов с параметрами:

$$U_3 = 5 \text{ B};$$

 $t_{3u} = 1 \text{ MKC};$
 $T = 40 \text{ MKC}.$

Заданные параметры схемы (Рис. 17) берутся из таблицы (Приложение 2, Таблица 5) согласно варианта выполнения практической работы.

Рассмотрим пример:

$$U_{H} = 25 \text{ B};$$
 $R_{H} = 500 \text{ OM};$
 $E_{n} = 25 \text{ B};$
 $\beta = 100.$

Расчет:

Рассчитаем ток нагрузки:

$$I_{H} = \frac{U_{H}}{R_{H}} = \frac{25}{500} = 50 \text{ mA}.$$

Коэффициент трансформации:

$$k_{m13} = \frac{E_n}{U_H} = \frac{25}{25} = 1.$$

Коллекторный ток:

$$I_{\kappa} = \frac{I_{\mu}}{k_{m13}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1} = 50 \text{ mA}.$$

Базовый ток, при котором транзистор закроется:

$$I_{\delta} = \frac{I_{\kappa}}{\beta} = \frac{0.05}{100} = 500 \text{ MKA}.$$

Максимальный базовый ток

$$I_{6 \text{ max}} = \frac{I_{\kappa \text{ max}}}{\beta} = \frac{0.1}{100} = 1 \text{ MA}.$$

Коэффициент трансформации базовой обмотки:

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

Диапазон выбора базового резистора вычисляется по формулам:

$$R_{\text{6 max}} = \frac{U_{W3}}{I_{\text{6}}} = \frac{3}{500 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ kOm};$$

$$R_{\text{6 min}} = \frac{U_{W3}}{I_{\text{6 max}}} = \frac{3}{0,001} = 3 \text{ kOm}.$$

Выберем $R_{\delta} = 3.5 \text{ кОм.}$

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

$$R_c = \frac{E_n}{I_{\kappa}} = \frac{25}{0.05} = 500 \text{ Om}.$$

В связи с тем, что в схеме используется конденсатор емкостью $C_t = 10 \text{ н}\Phi$, вычислим время импульса:

$$t_u = (t_1 - t_0) = R_6 C_t \ln \frac{U_{W3} + U_{\text{nop}}}{U_{W3} - U_{Ck}},$$

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

$$U_{Ck} = U_{W3} - U_{\text{nop}} - I_6 R_6 = 3 - 0.5 - 3000 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ B}.$$

Отсюда найдем время импульса:

$$t_u = 3000 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \ln \frac{3 + 0.5}{3 - 1} = 17 \text{ MKC}$$

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

$$t_n = (t_2 - t_1) = R_t C_t \ln \frac{E_{\Pi} + U_{C_{K}}}{E_{\Pi} - U_{\text{nop}}}.$$

Отсюда найдем номинал резистора R_t :

$$R_t = \frac{t_n}{C_t \ln \frac{E_\Pi + U_{C_\kappa}}{E_\Pi - U_{\Pi \text{op}}}} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-9} \ln \frac{25 + 1}{25 - 0.5}} \approx 30 \text{ kOm}.$$

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

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

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

3.3. Практическая работа 2. «Исследование автоколебательного блокинг-генератора»

Целью практической работы является изучение функционирования автоколебательного блокинг-генератора, экспериментальное исследование влияния параметров отдельных элементов схемы на формируемые интервалы времени. В макете используются транзистор КТ3102A с параметрами: $I_{\kappa max} = 100 \text{ мA}; \ U_{\kappa 9} = 50 \text{ B}; \ U_{nop} = 0,5 \text{ B}.$

Автоколебательный блокинг-генератор (Рис. 18) состоит ИЗ усилительного каскада, выполненного по схеме с общим эмиттером на транзисторе VT1 марки KT3102A, нагрузки R_{H} , подключенной через обмотку трехобмоточного трансформатора TV1. Положительная обратная связь осуществляется через дополнительную обмотку трансформатора, последовательно подключенную с базовым резистором R_{δ} . Цепь сброса энергии состоит из резистора R_c и диода VD1 марки KD522A. Конденсатор C_t и резистор R_t выполняют роль времязадающей цепочки.

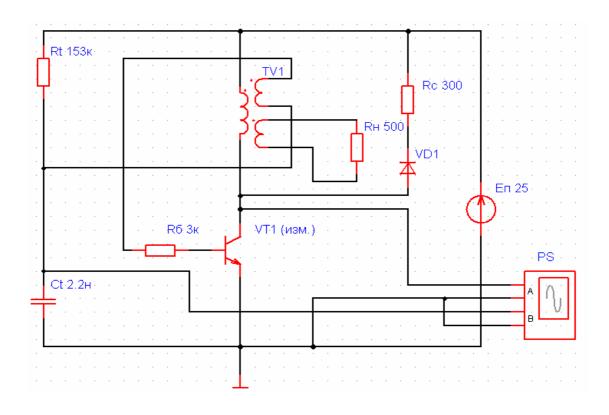


Рис. 18. Схема автоколебательного блокинг-генератора в ASIMEC

3.3.1. Программа работы:

- 3.3.1.1. В схеме автоколебательного блокинг-генератора с времязадающей цепью по параметрам, заданным в таблице (Приложение 2, Таблица 5), рассчитать элементы схемы: R_{δ} , R_{c} , R_{t} , C_{t} .
- 3.3.1.2. Открыть в ASIMEC файл *БГ.сіг* (Рис. 18) и присвоить схеме значения номиналов элементов, рассчитанных в п. 1.
- 3.3.1.3. Проверить работоспособность устройства (правильность расчетов), просмотрев с помощью осциллографа контрольные точки U_{H} , U_{K} ,

 U_c , I_{κ} . Представить осциллограммы напряжений в едином временном масштабе.

• 3.3.1.4. Провести экспериментальное исследование влияния параметров указанных элементов на протекающие в схеме процессы. Построить на графике следующие зависимости:

$$t_u = f(C_t)$$
 при $0.1C_t < C_t < 2 C_t$); $t_n = f(R_t)$ при $0.1R_t < R_t < 2 R_t$.

Объяснить полученные результаты.

- 3.3.1.5. Изменяя R_c ($R_{c1} = 300$ Ом, $R_{c2} = 500$ Ом, $R_{c3} = 700$ Ом, $R_{c4} = 1$ кОм.) провести измерения t_n и U_k . Результаты представить в таблице (Таблица 1). Сделать вывод.
- 3.3.1.6. Написать отчет по проделанной практической работе. Отчет должен содержать: титульный лист, исследуемую схему блокинг-генератора, расчет блокинг-генератора, осциллограммы в едином временном масштабе, экспериментальные графики, выводы по результатам работы.

Таблица 1

	t_n	U_k	$t_n \cdot U_k$
1			
2			
3			
4			

Параметры вариантов подобраны таким образом, чтобы студенты могли исследовать блокинг-генераторы с различными видами трансформаторов: повышающими, понижающими и с единичным коэффициентом трансформации, а также при различных токах нагрузки и различных коэффициентах усиления используемых транзисторов.

4. Исследование ждущего блокинг-генератора

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.

4.1. Мультивибратор с трансформаторной нагрузкой и положительной обратной связью

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. 19, a.

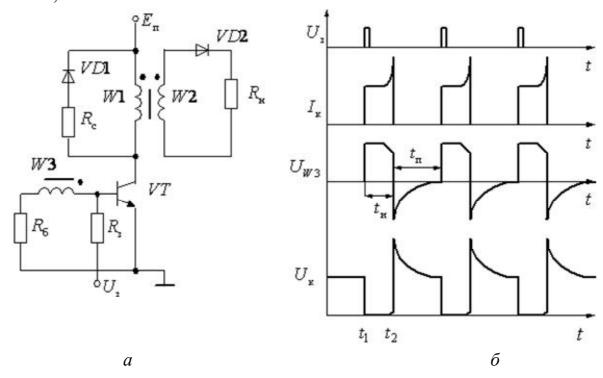


Рис. 19. Ждущий блокинг-генератор на биполярном транзисторе: схема замещения (a); временные диаграммы (δ)

Запуск ждущего блокинг-генератора осуществляется подачей сигнала запуска U_3 в цепь базы или импульсами отрицательной полярности,

подаваемыми в коллекторную цепь транзистора. Выходной сигнал снимается либо со специальной обмотки W2, либо с коллектора транзистора через разделительный конденсатор.

Принцип действия ждущего блокинг-генератора иллюстрируют диаграммы, представленные на Рис. 19, δ .

 $\it Uсходное\ cocmonnue\ -$ транзистор закрыт, поскольку напряжение на базе $\it U_{\it 0}$ меньше порогового уровня базо-эмиттерного перехода (чтобы транзистор не открылся под действием напряжения, создаваемого током $\it I_{k0}$, протекающим через резистор $\it R_{\it 0}$, необходимо выполнить условие: $\it I_{k0}\cdot\it R_{\it 0}\leq\it U_{nop}$, где $\it I_{k0}$ и $\it U_{nop}$ — 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_3 , по резистору R_3 сигнал поступает в базовую цепь. Под действием этого сигнала транзистор начинает открываться, что приводит к возникновению тока коллекторной цепи. Ток, протекающий по обмотке W1, индуцирует в базовой обмотке W3 ЭДС $e_6 \ge U_{nop}$ 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 W1 и W2, и током базы, величина которого зависит от напряжения обмотки W3 и величины резистора R_{δ} . 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 W1, 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. 19, δ).

Пока транзистор находится в режиме насыщения, напряжение на коллекторе не меняется: $U_k = U_{k + ac} \simeq 0$, но так как базовый ток в связи с уменьшением напряжения базовой обмотки уменьшается и в это же время увеличение коллекторного тока из-за намагничивания трансформатора в момент времени t_2 , транзистор выходит на границу насыщения. Ha формирование вершины режима ЭТОМ 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_{δ} , 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 W1 открывается диод VD1 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 W1 – резистор R_c – диод VD1 – начало обмотки W1. 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.

4.2. 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:

$$I_{\kappa max} = 100 \text{ mA};$$

 $U_{\kappa 9} = 50 \text{ B};$
 $U_{nop} = 0,5 \text{ B};$

и генератор прямоугольных импульсов с параметрами:

$$U_3 = 5 \text{ B};$$

 $t_{3u} = 1 \text{ MKC};$
 $T = 40 \text{ MKC}.$

Заданные параметры схемы берутся из таблицы (Приложение 3, Таблица 6) согласно варианта выполнения практической работы.

Рассмотрим пример:

$$U_{H} = 25 \text{ B};$$

 $R_{H} = 500 \text{ OM};$
 $E_{n} = 25 \text{ B};$
 $\beta = 100.$

Расчет:

Ток нагрузки:

$$I_{H} = \frac{U_{H}}{R_{H}} = \frac{25}{500} = 50 \text{ mA}$$

Коэффициент трансформации:

$$k_{m13} = \frac{E_n}{U_H} = \frac{25}{25} = 1.$$

Коллекторный ток:

$$I_{\kappa} = \frac{I_{H}}{k_{m13}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1} = 50 \text{ mA}.$$

Базовый ток, при котором транзистор закроется:

$$I_{\tilde{o}} = \frac{I_{\kappa}}{\beta} = \frac{0.05}{100} = 500 \text{ MKA}.$$

Максимальный базовый ток

$$I_{\text{6 max}} = \frac{I_{\kappa \text{ max}}}{\beta} = \frac{0.1}{100} = 1 \text{ MA}.$$

Коэффициент трансформации базовой обмотки:

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

Диапазон выбора базового резистора вычисляется по формулам:

$$R_{6 \text{ max}} = \frac{U_{W3}}{I_{6}} = \frac{3}{500 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ kOm};$$

$$R_{6 \text{ min}} = \frac{U_{W3}}{I_{6 \text{ max}}} = \frac{3}{0,001} = 3 \text{ кОм}.$$

Выберем $R_{\delta} = 3.5 \text{ кОм.}$

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

$$R_c = \frac{E_n}{I_{\nu}} = \frac{25}{0.05} = 500 \text{ Om}.$$

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

$$t_n = 3 \cdot Rt \cdot Ct = 25$$
 мкс

В связи с тем, что в схеме используется резистор с сопротивлением $R_t = 2 \text{ кOm}$, получим:

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

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

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

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

4.3. Практическая работа 3. «Исследование ждущего блокинггенератора»

Целью практической работы является изучение работы ждущего блокинг-генератора, экспериментальное исследование влияния параметров отдельных элементов схемы на формируемые интервалы времени. В макете используются транзистор КТ3102A с параметрами: $I_{\kappa max}=100$ мA; $U_{\kappa 9}=50$ B; $U_{nop}=0.5$ B; и генератор прямоугольных импульсов с параметрами: $U_3=5$ B; $t_{3u}=1$ мкс; T=40 мкс.

Ждущий блокинг-генератор (Рис. 20) состоит из усилительного каскада, выполненного по схеме с общим эмиттером на транзисторе VT1 марки KT3102A, нагрузки R_H , подключенной через обмотку трехобмоточного трансформатора TV1.

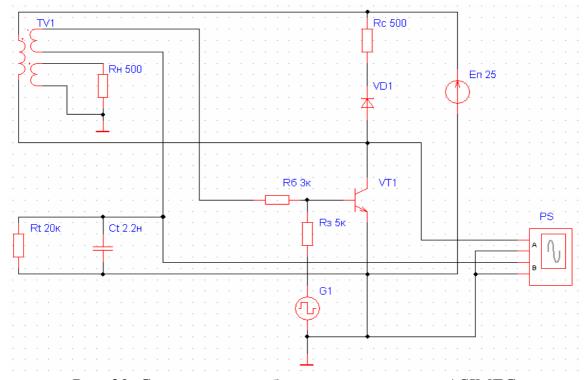


Рис. 20. Схема ждущего блокинг-генератора в ASIMEC

Положительная обратная связь осуществляется через дополнительную обмотку трансформатора, последовательно подключенную с базовым резистором R_6 . Цепь сброса энергии состоит из резистора R_c и диода VD1 марки KD522A. Поскольку ASIMEC не имеет возможности моделировать трансформатор в режиме насыщения, вследствие чего трансформатор не может выполнять функцию времязадающего элемента, в схему была введена времязадающая цепочка, состоящая из конденсатора C_t и резистора R_t . Отпирающие импульсы с задающего генератора G1 через резистор G1 поступают на базу транзистора G1.

4.3.1. Программа работы

- 4.3.1.1. В схеме ждущего блокинг-генератора по параметрам, заданным в таблице (Приложение 3, Таблица 6), рассчитать элементы схемы: R_6 , R_c , C_t .
- 4.3.1.2. Открыть в ASIMEC файл **ЖБГ.сіг** (Рис. 20) и присвоить схеме значения номиналов элементов, рассчитанных в п 4.2.
- 4.3.1.3. Проверить работоспособность устройства (правильность расчетов), просмотрев с помощью осциллографа контрольные точки $U_{\rm H},\,U_{\rm K},\,U_{\rm C},\,I_{\rm K}$. Представить осциллограммы напряжений в едином временном масштабе.
- 4.3.1.4. Провести экспериментальное исследование влияния параметров указанных элементов на протекающие в схеме процессы. Построить зависимости.

$$t_u = f(C_t)$$
 при $0.1C_t < C_t < 2 C_t$; $t_{pas} = f(R_t)$ при $0.1R_t < R_t < 2 R_t$.

Объяснить полученные результаты.

• 4.3.1.5. Написать отчет по проделанной практической работе. Отчет должен содержать: титульный лист, исследуемую схему блокинг-генератора, расчет блокинг-генератора, осциллограммы в едином временном масштабе, экспериментальные графики, выводы по результатам работы.

Параметры вариантов подобраны таким образом, что бы студенты могли исследовать блокинг-генераторы с различными видами трансформаторов: повышающими, понижающими и с единичным коэффициентом трансформации, а также при различных токах нагрузки и различных коэффициентах усиления используемых транзисторов.

5. 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 $(U_{\rm H},\ I_{\rm H})$, 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.

5.1. Расчет оконечного ключевого каскада с изолированной нагрузкой

Схема каскада представлена на Рис. 21.

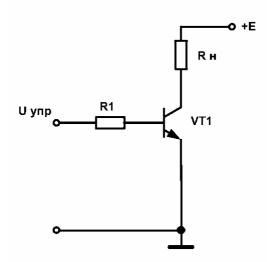


Рис. 21. Ключевой каскад с изолированной нагрузкой

Расчет начинается с выбора напряжения источника питания:

$$E_{num} = U_{H} + U_{\kappa \ni \ Hac}$$
,

где $U_{\kappa_{9\;Hac}}$ – напряжение коллектор – эмиттер насыщенного ключа, является параметром транзистора, в большинстве случаев составляет доли вольта и при инженерных расчетах, когда $U_{\scriptscriptstyle H} \ge 10 \cdot U_{\kappa_{9\;Hac}}$, может не учитываться.

Следующим шагом выбирается транзистор из условия:

 $U_{\kappa_{\mathfrak{I}} \; \mathrm{max}} \geq E_{\mathit{num}}$, только для активной нагрузки;

$$\begin{split} I_{\kappa \text{ max}} \geq I_{\scriptscriptstyle H} \,, \\ P_{\partial on} \leq I_{\scriptscriptstyle H} \cdot U_{\scriptscriptstyle K9 \ HAC} + P_{\partial u\scriptscriptstyle H} \,, \end{split}$$

где $U_{\kappa_{9}\,\,\mathrm{max}}$, $I_{\kappa\,\,\mathrm{max}}$, $P_{\partial on}$ — параметры транзистора, $P_{\partial u H}$ — динамические потери, мощность, выделяемая на транзисторе при включении и выключении ключа:

$$P_{\partial uH} = \frac{t_{BK\Pi}}{T} \cdot \frac{I_H \cdot U_H}{2}.$$

Рассчитывается базовый ток транзистора

$$I_{\tilde{o}} = \frac{K_{hac} \cdot I_{\kappa}}{\beta_{\min}},$$

где β_{\min} — параметр транзистора, K_{hac} — коэффициент насыщения, применяется для предотвращения перехода транзистора из режима насыщения в активный режим при изменении температуры. Обычно принимают $K_{hac}=1.2-2$, следует помнить, что увеличение K_{hac} 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 $I_{\mathfrak{G}_{9}}$, при этом на переходе база-эмиттер создается падение напряжения $U_{\mathfrak{G}_{9}}$. В инженерных расчетах напряжение $U_{\mathfrak{G}_{9}}$ для кремниевых транзисторов принимается равным 0,7 В, или определяется по входной характеристике транзистора.

Базовый резистор $R_{\tilde{o}}$ ограничивает ток $I_{\tilde{o}}$ и может быть рассчитан по формуле:

$$R_{\tilde{o}} = \frac{U_{ynp} - U_{\tilde{o}\tilde{g}}}{I_{\tilde{o}}}.$$

В многокаскадных ключевых усилителях закрывание транзистора обеспечивается или шунтированием перехода база-эмиттер транзистора другим ключом, или прерыванием тока базы (Рис. 22), во всех случаях закрытое состояние ключа обеспечивается, когда $U_{\delta 9}=0$, при этом переход база-эмиттер транзистора должен быть зашунтирован внешним сопротивлением $R_{\delta 9}$. Величина этого сопротивления должна быть такой, чтобы ток $I_{\kappa 0}$ (обратный ток коллектора, параметр транзистора), протекающий по цепи коллектор – база – общий вывод, не создавал на нем падение напряжения, которое могло бы открыть транзистор, $U_{R\delta 9} \leq 0.4$ В,

кроме того, этот резистор обеспечивает цепь вытекания зарядов из области базы в момент выключения, чем способствует скорейшему закрыванию транзистора VT1.

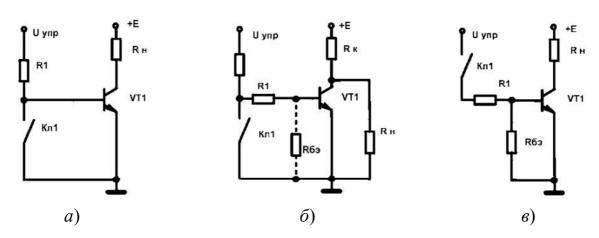


Рис. 22. Способы запирания транзистора ключевого каскада: непосредственное замыкание перехода база-эмиттер (a); замыкание перехода база-эмиттер через резистор (δ); размыкание цепи протекания базового тока (ϵ)

В инженерных расчетах при определении $R_{\tilde{o}_{9}}$ можно руководствоваться следующими рекомендациями:

$$\begin{split} I_{\kappa} \leq &1 \text{ A, } \rightarrow R \delta \mathfrak{I} \leq 1 \text{ кОм;} \\ I_{\kappa} \leq &10 \text{ A, } \rightarrow R \delta \mathfrak{I} \leq 100 \text{ Om;} \\ I_{\kappa} \geq &10 \text{ A, } \rightarrow R \delta \mathfrak{I} \leq 10 \text{ Om.} \end{split} \tag{1}$$

На Рис. 22 приведены варианты схем управления транзистором в оконечном каскаде. В промежуточных каскадах в качестве U_{ynp} выступает E_{mum} .

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.

5.2.1. Расчет оконечного каскада ОЭ

Схема каскада представлена на Рис. 23. Расчет каскада состоит из следующих этапов:

1. Выбор соотношения между R_{H} и R_{K} . При выборе надо учитывать, что чем больше R_{K} , тем больше необходимо напряжение питания для обеспечения заданного напряжения U_{H} и тем меньше ток I_{K} транзистора, что видно из уравнений:

$$U_{\scriptscriptstyle H} = \frac{E_{num}}{R_{\scriptscriptstyle K} + R_{\scriptscriptstyle H}} \cdot R_{\scriptscriptstyle H} \,, \qquad I_{\scriptscriptstyle H} = \frac{E_{num}}{R_{\scriptscriptstyle K} + R_{\scriptscriptstyle H}} \,.$$

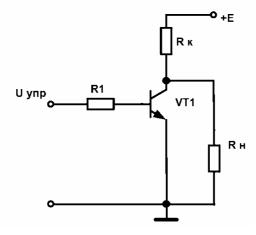


Рис. 23. Ключевой каскад ОЭ

2. Рассчитывается величина Rк и выбирается напряжение источника питания:

$$E_{num} = I_{\scriptscriptstyle H} \cdot (R_{\scriptscriptstyle K} + R_{\scriptscriptstyle H}) \,.$$

3. Рассчитывается ток коллектора

$$I_{\kappa} = \frac{E_{num}}{R_{\kappa}}.$$

4. Исходя из соотношений:

$$\begin{split} &U_{\kappa \ni \max} \ge U_{\scriptscriptstyle H}, \\ &I_{\kappa \max} \ge I_{\kappa}, \\ &P_{\partial on} \le I_{\kappa} \cdot U_{\kappa \ni \; \textit{Hac}} + P_{\partial \textit{UH}} \end{split}$$

выбирается транзистор. Соотношение между R_{κ} и R_{H} 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.

5.2.2. Расчет оконечного каскада ОК

Схема каскада представлена на Рис. 24. 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:

$$U_{v} = U_{96} + U_{H}$$
.

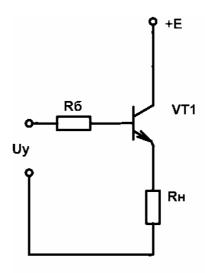


Рис. 24. Ключевой каскад ОК

Транзистор будет находиться в активном режиме, а следовательно потреблять значительную мощность, до тех пор, пока Uy не станет больше, чем E_{num} (т.к. $E_{num} = U_{\kappa 9} + U_{\mu}$), 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:

$$\begin{split} &U_{\kappa9\,\text{max}} \geq E_{num}, \\ &I_{\kappa\,\text{max}} \geq I_{\scriptscriptstyle H}, \\ &P_{\partial on} \leq I_{\scriptscriptstyle H} \cdot U_{\kappa9}. \end{split}$$

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

Определение параметров источника управления:

$$\begin{split} \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{y}} &= \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{\delta}} \cdot \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{U}_{\scriptscriptstyle{H}} + \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\vartheta}}, \\ \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{v}} &= \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\delta}}. \end{split}$$

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

Схема каскада представлена на Рис. 25. Расчет этого каскада не отличается от расчета каскада с изолированной нагрузкой. Изменяется только выбор напряжения источника управления:

$$U_{y} = E_{num} - U_{\delta9} - R_{\delta9} \cdot I_{\delta} \,.$$
 HE

Рис. 25. Каскад ОЭ на транзисторе с обратным типом проводимости

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. 26.

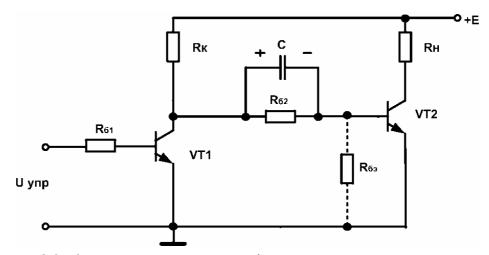


Рис. 26. Ключевой усилитель с форсирующим конденсатором

При расчете такого усилителя следует помнить, что в начальный момент времени, когда транзистор VT1 закрывается, базовый ток транзистора VT2 ограничивается только резистором R_{κ} , т.к. напряжение на конденсаторе равно нулю:

$$I_{\text{бнач}} = \frac{E - U_{\text{бэ}}}{R_{\kappa}}.$$

Резистор R_{κ} следует выбирать таким образом, чтобы в начальный момент I_{δ} не превысил $I_{\delta \max}$ (параметр транзистора):

$$R_{\kappa} \ge \frac{E - U_{\tilde{o}_{\tilde{o}}}}{I_{\tilde{o} \max}}.$$

По мере заряда конденсатора базовый ток транзистора VT2 падает и после окончания переходного процесса достигает номинальной величины:

$$I_{\tilde{o}} = \frac{E - U_{\tilde{o}_{\tilde{o}}}}{R_{\kappa} + R_{\tilde{o}_{\tilde{o}}}}.$$

При этом конденсатор заряжается до напряжения:

$$U_c = \frac{E - U_{\tilde{o}9}}{R_{\kappa} + R_{\tilde{o}2}} \cdot R_{\tilde{o}2}.$$

В момент открывания транзистора VT1, левая обкладка конденсатора C через открытый транзистор оказывается на общем выводе, а правая минусом прикладывается к базе, в результате этого транзистор VT2 быстро закрывается за счет напряжения U_c , приложенного к переходу база-эмиттер, при этом может случиться, что оно превысит максимально допустимое запирающее напряжение $U_{9\delta}$ (параметр транзистора), что в свою очередь приведет к выходу из строя транзистора.

Исходя из вышеизложенного, рекомендуется следующий порядок расчета резисторов усилителя:

1. Рассчитывается резистор R62:

$$R_{62} \leq \frac{U_{96}}{I_{62}};$$

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

$$I_{R\tilde{o}_{\mathfrak{I}}} = \frac{U_{\tilde{o}_{\mathfrak{I}}}}{R_{\tilde{o}_{\mathfrak{I}}}},$$

Если этот ток не превышает 10% от базового тока, то его можно не учитывать. Если превышает, то при дальнейших расчетах в формулы вместо тока $I_{\tilde{6}}$ надо подставлять сумму токов $I_{R\tilde{6}} + I_{\tilde{6}}$.

3. Рассчитывается резистор R_{κ} :

$$R_{\kappa} = \frac{E - U_{96} - R_{62} \cdot I_{62}}{I_{62}};$$

4. Проверяется выполнение условия, что начальный ток базы *VT*2 не превышает предельно допустимого:

Если это условие не выполняется, то надо выбрать R_{62} меньше, а R_{κ} больше и повторить расчеты.

5.4. Практическая работа 4. «Расчет усилительного каскада»

Данная практическая работа фиксирует умение и навыки студентов в части расчета схем электрических цепей — это необходимая компетенция, приобретаемая в рамках дисциплины «Схемотехника». Одним из пунктов данной практической работы является расчет схемы параметров усилительного каскада по заданным параметрам согласно варианту.

Варианты индивидуальных заданий содержит Приложение 4.

Ход практической работы:

- 5.4.1. Построить схему согласно индивидуальному заданию (Приложение 4) в имитационном комплексе ASIMEC.
- 5.4.2. Дефрагментировать усилительный каскад на подсистемы типовые усилители, изученные в п.п.5.1 5.3 настоящего пособия.
- 5.4.3. Определиться со входными и выходными данными каждой подсистемы, произвести расчет, согласно изученным методикам (п.п.5.1 5.3).
- 5.4.4. Произвести моделирование схемы в имитационном комплексе ASIMEC, подавая различные входные и управляющие уровни напряжений на соответствующие входа усилительного каскада.
- 5.4.5. Фиксировать выходное напряжение и ток схемы для каждого замера в соответствии с параметрами индивидуального задания.

- 5.4.6. Составить нагрузочную и регулировочную характеристики усилительного каскада.
- 5.4.7. Подготовить отчет по практической работе.

6. 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.

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_{cm} , равный отношению относительного приращения напряжения на входе стабилизатора к относительному приращению напряжения на выходе:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}} : \frac{\Delta U_{eblx}}{U_{eblx}}.$$
 (2)

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

$$\eta = \frac{P_{H}}{P_{ex}}.$$
 (3)

3. Выходное сопротивление стабилизатора *Rвых*, характеризующее изменение выходного напряжения к изменению выходного тока, при постоянном входном напряжении:

$$R_{ebix} = \frac{\Delta U_{_H}}{\Delta I_{_H}} \,. \tag{4}$$

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

6.2. Параметрические стабилизаторы

Параметрический стабилизатор (Рис. 27, a) 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. 27, a) находится на обратной ветви ВАХ стабилитрона и задается балластным резистором R_{b} . При изменении входного напряжения на величину ΔU_{ax} изменяется ток через стабилитрон, но напряжение на стабилитроне, а значит напряжение на нагрузке, меняется незначительно.

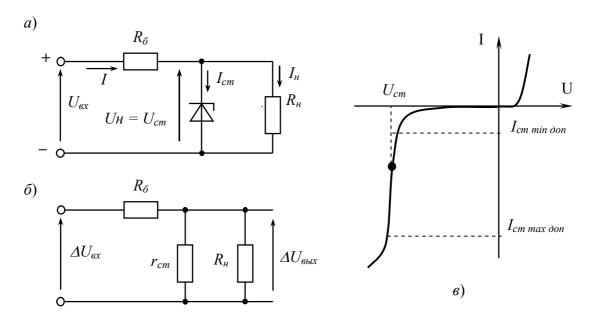


Рис. 27. Параметрический стабилизатор напряжения параллельного типа: электрическая схема (a); эквивалентная схема стабилизатора для приращений напряжений (δ) BAX стабилитрона (ϵ)

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.

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:

$$R_{\tilde{o}} = \frac{U_{ex \min} - U_{H}}{I_{cm \min} - I_{H \max}}.$$

Причем должны соблюдаться следующие условия:

$$\begin{split} I_{cm\,\text{min}} = & \frac{U_{\textit{6x}\,\text{min}} - U_{\textit{H}}}{R_{\textit{6}}} - I_{\textit{H}\,\text{max}} > I_{\textit{cm}\,\text{min}\,\textit{∂on}}\,, \end{split}$$

$$I_{cm\,\mathrm{max}} = \frac{U_{ex\,\mathrm{max}} - U_{_{H}}}{R_{_{\tilde{\mathcal{O}}}}} - I_{_{H}\,\mathrm{min}} < I_{cm\,\mathrm{max}\,\partial on}\,,$$

где $I_{cm \min \partial on}$ и $I_{cm \max \partial on}$ — минимальное и максимальное допустимое значения токов конкретного стабилитрона.

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора равен:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}} : \frac{\Delta U_{eblx}}{U_{eblx}} = \frac{R_{\delta}}{r_{cm}} \cdot \frac{U_{H}}{U_{ex}},$$

где r_{cm} - динамическое сопротивление стабилитрона.

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

$$R_{ebix} = \frac{\partial U_{ebix}}{\partial I_{\mu}} \approx r_{cm} \,.$$

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 $R_{\rm выx}$, а также узкий и нерегулируемый диапазон стабилизируемого напряжения.

6.3. Компенсационные стабилизаторы

Компенсационные стабилизаторы представляют собой систему автоматического регулирования, где регулирующее сопротивление R_{ynp} управляется внешним сигналом U_{ynp} , 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. 28. 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_{ynp} , при котором отклонение уменьшается и выходное напряжение приближается к заданному значению, т.е. стабилизируется.

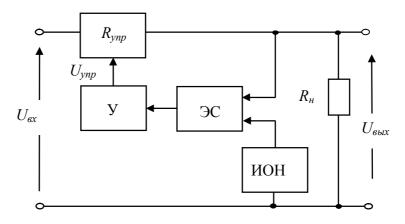


Рис. 28. Структурная схема последовательного компенсационного стабилизатора

Одна из простейших схем последовательного компенсационного стабилизатора представлена на Рис. 29.

Здесь транзистор VTI 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.

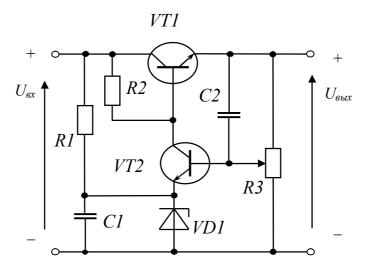


Рис. 29. Последовательный компенсационный стабилизатор

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.

6.4. Практическая работа 5. «Исследование стабилизатора напряжения»

6.4.1. Параметрический стабилизатор напряжения

• 6.4.1.1. В соответствии с параметрами индивидуального задания, варианты которых содержит Таблица 7 (см. Приложение 5), выбрать тип стабилитрона. Создать в системе моделирования электронных схем ASIMEC *spice-модель* стабилитрона. Для этого необходимо в файле библиотеки (*.lib), находящегося по пути: C:\Program Files\Asimec v2\Libs\SAMPLE.lib сделать запись по шаблону:

```
.model KS147A D(IS=1.0e-12 RS=20 CJO=85p M=0.5 VJ=0.8
+ IBV=5e-6 BV=4.1 TT=70n EG=1.11 FC=0.5 XTI=3 N=1)
```

Значения параметров *spice-модели* стабилитрона содержит Таблица 2, в описании модели допустимы только латинские буквы. Для данной практической работы в каждом варианте достаточно изменять только выделенные жирным параметры модели.

IS Ток насыщения RS Объемное сопротивление N Коэффициент неидеальности TT Время переноса заряда CJO Барьерная емкость при нулевом смещении VJ Контактная разность потенциалов Коэффициент плавности перехода M EG Ширина запрещенной зоны XTI Температурный коэффициент тока насыщения FC Коэффициент нелинейности барьерной емкости BVНапряжение обратного пробоя **IBV** Начальный ток пробоя

Таблица 2. Параметры модели стабилитронов¹

• 6.4.1.2. На рабочем поле программы ASIMEC собрать схему для снятия ВАХ стабилитрона (Рис. 30). Значение напряжения источника Е1 взять из

49

¹ Более подробная информация о модели и параметрах модели стабилитрона по адресу: http://spice.distudy.ru/identification/zener/index.html

индивидуального задания (Таблица 7). Изменяя сопротивление резистора R1 снять и построить обратную ветвь BAX стабилитрона.

По характеристике определить минимальные и максимальные значения тока (I_{cm}) и напряжения стабилизации (U_{cm}) стабилитрона, сравнить полученные значения с данными сводной таблицы (Таблица 8, Приложение 5) и настроить модель стабилитрона.

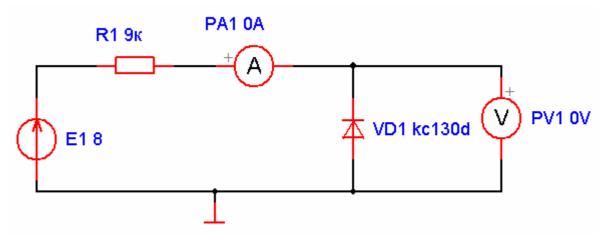


Рис. 30. Схема для снятия ВАХ стабилитрона

• 6.4.1.3. Рассчитать параметрический стабилизатор в соответствии с заданным вариантом. Собрать на рабочем поле программы ASIMEC модель стабилизатора напряжения по Рис. 31.

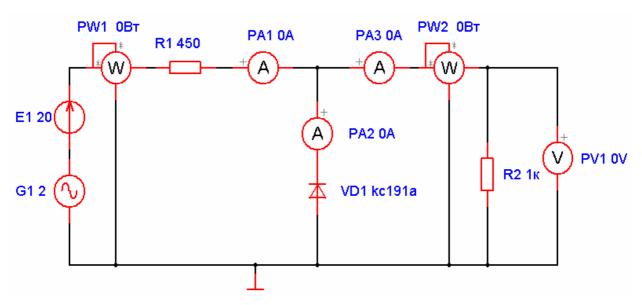


Рис. 31. Модель стабилизатора напряжения в ASIMEC

В этом примере источник переменного напряжения G1 имитирует нестабильность ΔU_{ex} входного источника E1. В параметрах источника G1 следует задавать: частоту (freq) — 50 Гц, амплитуду синусоидального напряжения (va) — $0.5 \cdot \Delta U_{ex}$.

Запустить моделирование, измерить ток в цепи стабилитрона VD1. Ток через стабилитрон должен находиться примерно на середине диапазона минимального и максимального значений. При необходимости скорректировать величину балластного резистора R1.

- 6.4.1.4. Пользуясь показаниями ваттметров PW1 и PW2 определить к.п.д. стабилизатора в номинальном режиме по формуле (3) из п. 6.1.

$$K_{cm} = \frac{K_{n \, \text{ex}}}{K_{n \, \text{eblx}}} = \frac{U_{a \, \text{ex}}}{U_{a \, \text{eblx}}} \times \frac{U_{\text{eblx} \, \text{hom}}}{U_{\text{ex} \, \text{hom}}}$$

Для этого с помощью двухканального осциллографа измерить амплитуду пульсаций (половина размаха синусоидального напряжения) на входе $(U_{a\, в s x})$ и выходе $(U_{a\, в s x})$ схемы (для измерения рекомендуется пользоваться электронными курсорами), номинальное значение выходного напряжения измерить вольтметром PV1, номинальное значение входного напряжения – приравнять E1.

Сравнить результаты. Как увеличить коэффициент стабилизации?

• 6.4.1.6. Снять и построить нагрузочную характеристику стабилизатора $U_{\text{вых}} = f(R_{\text{н}})$. Сопротивление нагрузки стабилизатора изменять в таких пределах, чтобы ток через стабилитрон не превышал минимального и максимального значений тока. Объяснить полученную характеристику.

6.4.2. Компенсационный стабилизатор

• 6.4.2.1. Провести предварительный расчет компенсационного стабилизатора приведенного на Рис. 32, исходные данные индивидуальных заданий содержит Таблица 9 (Приложение 6).

Сопротивление резистора R1 определяется по соотношению:

$$R1 = \frac{\left(E1 - U_{69 \text{ vt1}} - U_{6blx}\right) \cdot \beta}{I_{H}},$$

где,
$$U_{\textit{бэ vt1}} \approx 0.7 \; \text{B}$$
, а $I_{H} = \frac{U_{\textit{вых}}}{\textit{R5}}$.

Для расчета параметрического стабилизатора (R2, VD1) рекомендуется из таблицы параметров стабилитронов (Таблица 8, Приложение 5), выбрать стабилитрон с напряжением стабилизации равным примерно половине $U_{\rm вых}$.

Расчет делителя напряжения:

$$R3 = \frac{U_{\textit{вых}} - U_{\textit{cm}} - U_{\textit{бэ vt2}}}{I_{\textit{дел}}}\,, \qquad R4 = \frac{U_{\textit{бэ vt2}} + U_{\textit{cm}}}{I_{\textit{дел}}},$$
 где, $U_{\textit{бэ vt2}} \approx 0.7 \; \text{B} \;, \; I_{\textit{дел}} = 0.01 \; \text{A} \;.$

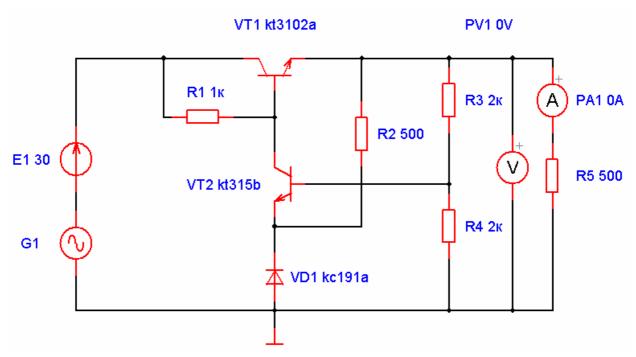


Рис. 32. Модель компенсационного стабилизатора напряжения в ASIMEC

6.4.2.2. В системе ASIMEC создать модели выбранного стабилитрона (аналогично п.п. 6.4.1.1, 6.4.1.2, Рис. 30).

Создать модели биполярных транзисторов VT1, VT2 по шаблону², параметрами сводной приведенному ниже, пользуясь ИЗ таблицы (Таблица 10, Приложение 7).

.model KT315B npn (Bf=60 Br=2 RB=5 RC=1 RE=2 IS=7E-10 + VJ=1)

² В шаблоне изменяемые параметры модели и тип биполярного транзистора выделены жирным шрифтом

- 6.4.2.3. В системе ASIMEC собрать схему компенсационного стабилизатора по Рис. 32. Запустить моделирование, измерить напряжение на нагрузке, в случае необходимости скорректировать величину резистора *R*3 для получения напряжения нагрузке в соответствии с индивидуальным заданием.
- 6.4.2.4. Определить коэффициент стабилизации схемы по формуле (2) из п. 6.1.
- 6.4.2.5. Снять и построить нагрузочную характеристику стабилизатора $U_{\text{вых}} = f(R_{\text{н}})$, сопротивление нагрузки рекомендуется изменять в пределах от $0.4R_{\text{н}}$ до $2R_{\text{н}}$. Объяснить результаты.
- 6.4.2.6. Экспериментально определить к.п.д. схемы в номинальном режиме по формуле (3) из п. 6.1.
- 6.4.2.6. Сравнить основные характеристики параметрического и компенсационного стабилизаторов.

Содержание от статемие со сермать все пункты программы работы, исследуемые схемы, необходимые таблицы и графики, ответы на контрольные вопросы.

6.4.3. Контрольные вопросы

Какое минимальное напряжение может быть на входе компенсационного стабилизатора?

Поясните работу параметрического и компенсационного стабилизаторов в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания нагрузки.

Каким образом по BAX стабилитрона можно определить его динамическое сопротивление?

Чем отличается режим работы стабилитрона и стабистора?

Список литературы

- 1. Герасимов В. М., Скворцов В. А. Электронные цепи и микросхемотехника. Схемотехника ключевых устройств формирования и преобразования сигналов: Учебное пособие / Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники. Томск: ТУСУР, 2007. 208 с.: ил., табл. Библиогр.: с. 207-208. 189.10 р. (наличие в библиотеке ТУСУР 92 экз.)
- 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, свободный.
- 3. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для средних специальных учебных заведений связи / Б. А. Калабеков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 336 с.: ил., табл. (Учебник. Специальность для техникумов). Библиогр.: с. 334. ISBN 5-93517-008-6 (наличие в библиотеке ТУСУР 135 экз.)
- 4. 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.)
- 5. Микросхемотехника и наноэлектроника [Текст] : учебное пособие для вузов / А. Н. Игнатов. СПб. : Лань, 2011. 528 с. : ил. (Учебники для вузов. Специальная литература). Библиогр.: с. 515-522. ISBN 978-5-8114-1161-0 (наличие в библиотеке ТУСУР 4 экз.)
- 6. 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.)
- 7. Основные схемотехнические структуры цифровой интегральной микроэлектроники: Презентация / Легостаев Н. С. 2015. 27 с. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://edu.tusur.ru/publications/5585, свободный.
- 8. Классификация интегральных микросхем. Система обозначений интегральных микросхем: Презентация / Легостаев Н. С. 2015. 30 с.

- [Электронный ресурс] Режим доступа: http://edu.tusur.ru/publications/5579, свободный.
- 9. Искусство схемотехники [Текст] : монография / П. Хоровиц, У. Хилл. 7-е изд. М. : БИНОМ, 2014. 704 с. : табл., рис. Пер. с англ. ISBN 978-5-9518-0351-1 (наличие в библиотеке ТУСУР 1 экз.)
- 10. 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]. http://www.ie.tusur.ru/docs/lns/mst.zip
- 11. Башкиров В. Н., Орлов А. А. Лабораторный практикум по дисциплине «Микросхемотехника» для студентов специальности 210104.65 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» [Электронный ресурс]. http://ie.tusur.ru/docs/lns/l_mst.rar
- 12. Микросхемотехника. Цифровая микросхемотехника : учебнометодическое пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов ; ред. П. Е. Троян ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Томск : ТУСУР, 2007. 123[1] с. : ил., табл. (Приоритетные национальные проекты. Образование). Библиогр.: с. 6-7. ISBN 978-5-86889-450-3 : 48.53 р. (наличие в библиотеке ТУСУР 98 экз.)
- 13. 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, свободный.
- 14. Денисов Н.П., Шарапов А.В., Шибаев А.А. Электроника и схемотехника. Часть 2. Томск, 220 с.
 - 15. http://spice.distudy.ru/identification/zener/index.html
- 16. Патентная база РФ по топологиям интегральных схем: http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/

Приложения

Приложение 1

Таблицы вариантов для **практической работы 1** «Исследование цифроаналоговых преобразователей»

Таблица 3

№Bap.	R1,кОм	R2,кОм	R3,кОм	R4,кОм	Roc , Ом	Р к, Ом	D
1	1	2	4	8	500	120	5
2	2	4	8	16	1000	240	6
3	3	6	12	24	1500	300	7
4	0,5	1	2	4	250	60	8
5	1	2	4	8	500	100	9
6	2	4	8	16	1000	180	A
7	3	6	12	24	1500	340	В
8	0,5	1	2	4	250	80	C
9	1	2	4	8	500	140	D
10	2	4	8	16	1000	200	Е

Таблица 4

№ Bap.	R1, кОм	R2, кОм	Roc, кОм	D1	D2
1	0,5	1	1,5	Е	0001
2	1	2	3	D	0010
3	2	4	6	С	0100
4	3	6	9	В	1000
5	4	8	12	A	0001
6	0,5	1	1,5	9	0010
7	1	2	3	8	0100
8	2	4	6	7	1000
9	3	6	9	6	0001
10	4	8	12	5	0100

Таблица вариантов для **практической работы 2** «Исследование автоколебательного блокинг-генератора»

Таблица 5

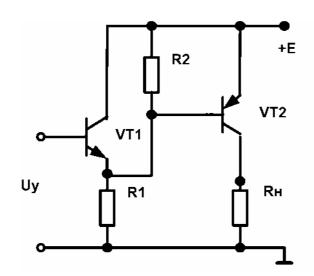
No	<i>U</i> _н (В)	$R_{\scriptscriptstyle H}\left(\mathrm{Om}\right)$	E_n (B)	β	U_{w3}	11
1	15	300	15	110	2	3.10-5
2	20	400	20	120	2,5	3.10-5
3	25	500	25	100	3	3.10-5
4	30	600	30	110	3,5	$3 \cdot 10^{-5}$
5	35	700	35	120	4	$3 \cdot 10^{-5}$
6	35	700	35	120	4	3.10-5
7	30	600	30	110	3,5	3.10-5
8	25	500	25	100	3	$3 \cdot 10^{-5}$
9	20	400	20	120	2,5	3.10-5
10	15	300	15	110	2	3.10-5

Таблица вариантов для **практической работы 3** «*Исследование ждущего блокинг-генератора*»

Таблица 6

No	<i>U</i> _н (В)	$R_{\scriptscriptstyle H}\left(\mathrm{Om}\right)$	E_n (B)	β	U_{w3}	11
1	15	300	15	110	2	3.10-5
2	20	400	20	120	2,5	3.10-5
3	25	500	25	100	3	3.10-5
4	30	600	30	110	3,5	3.10-5
5	35	700	35	120	4	$3 \cdot 10^{-5}$
6	35	700	35	120	4	$3 \cdot 10^{-5}$
7	30	600	30	110	3,5	3.10-5
8	25	500	25	100	3	$3 \cdot 10^{-5}$
9	20	400	20	120	2,5	$3 \cdot 10^{-5}$
10	15	300	15	110	2	3.10-5

Варианты индивидуальных заданий к практической работе 4

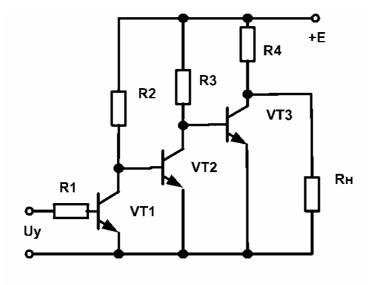


Вариант 1

RH=10 OM
UH=10 B
$$\mathcal{B}_{1,2} = 50$$

Uy = ?

Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов

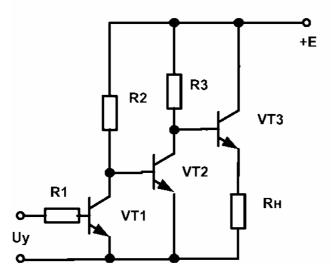


Вариант 2

U_H=10 B
P_H=10 B_T
$$\mathcal{G}_{1,2,3} = 30$$

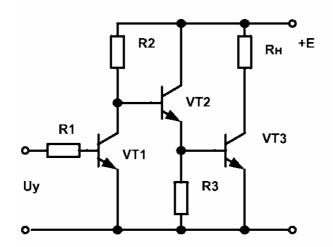
U_y = ?

Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов



Вариант 3

Uн=10 В
Ін=100 mA
$$\mathcal{G}_{1,2,3}$$
 = 10
Uy = ?





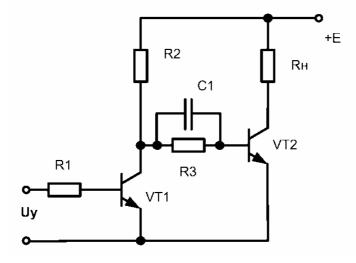
Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов

R2 VT2 RH RH VT3 VT3 Uy R5

Вариант 5



Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов

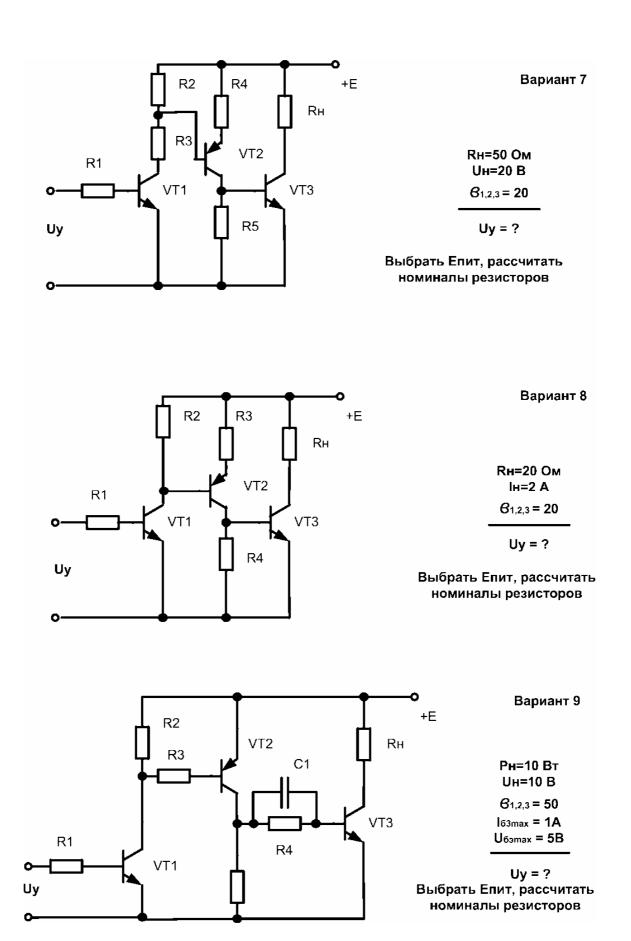


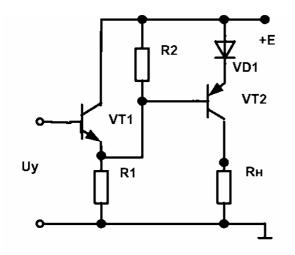
Вариант 6

PH=10 BT
UH=10 B

$$G_{1,2} = 50$$
 $I_{62max} = 1A$
 $U_{63max} = 5B$

Uy = ?

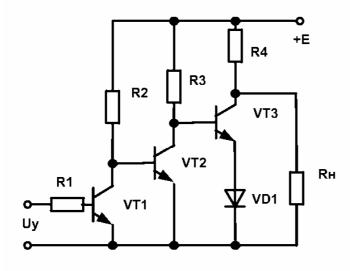




RH=10 OM UH=10 B e1,2 = 50 Unpvo1 = 1B

Uy = ?

Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов



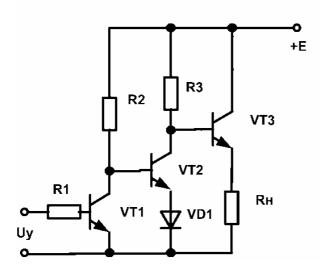
Вариант 11

Uн=10 В Рн=10 Вт

 $G_{1,2,3} = 30$ Unpvo₁ = 1B

Uy = ?

Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов



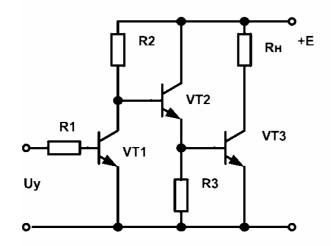
Вариант 12

Uн=10 В Ін=100 mA

 $G_{1,2,3} = 10$

 $Unp_{VD1} = 1B$

Uy = ?





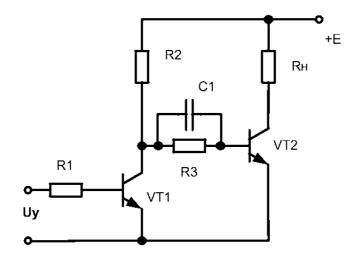
Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов

R2 VT2 RH +E RH VT3 VT3 VT3

Вариант 14



Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов

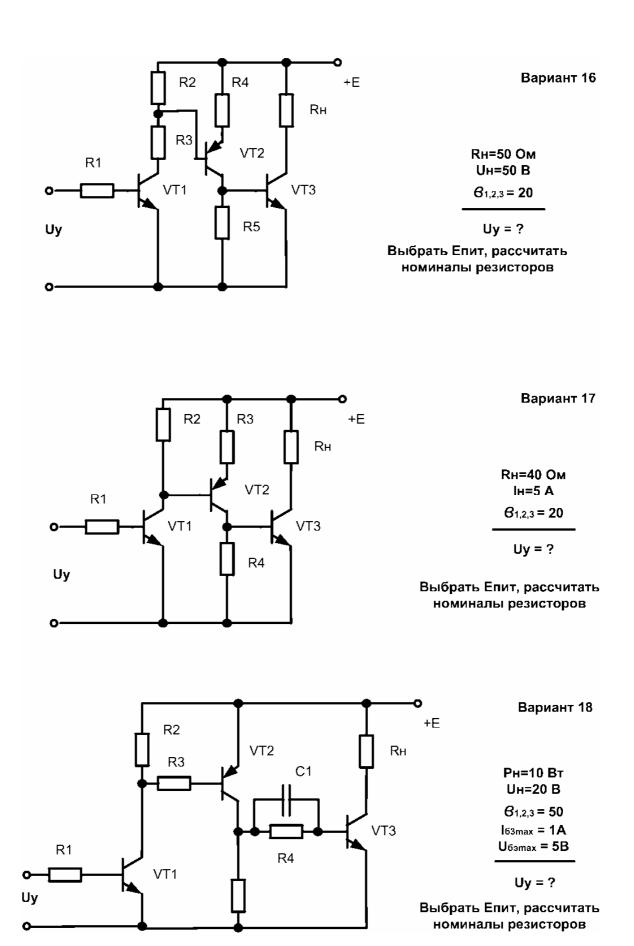


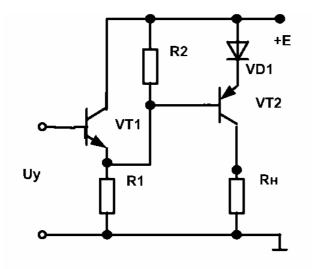
Вариант 15

PH=10 BT
UH=20 B

61,2 = 40
I62max = 1A
U63max = 5B

Uy = ?

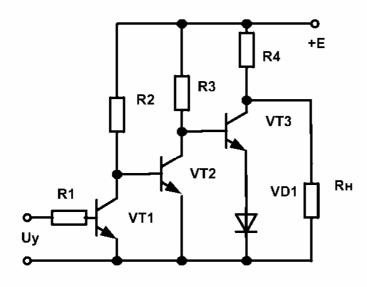




RH=50 OM UH=20 B e1,2 = 50 Unpvo1 = 1B

Uy = ?

Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов



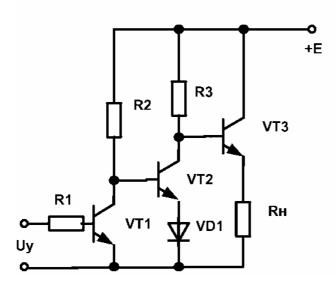
Вариант 20

Uн=50 В Рн=10 Вт

 $G_{1,2,3} = 30$ UnpvD1 = 1B

Uy = ?

Выбрать Епит, рассчитать номиналы резисторов



Вариант 21

Uн=50 В Ін=100 mA

 $6_{1,2,3} = 10$

 $U\pi p_{VD1} = 1B$

Uy = ?

Варианты индивидуальных заданий к практической работе 5

Таблица 7. Параметры схем стабилизатора

				i eraeminsarepa
№ варианта	$U_{\it вых ном}$, В	<i>R</i> _{н тіп} , кОм	$U_{\it ex hom}$, В	$\pm \Delta U$ ex, %
1	3,0	0,3	8	10
2	3,3	0,4	9	10
3	3,9	0,4	9	10
4	4,7	0,3	10	10
5	5,6	0,5	11	15
6	6,8	0,7	13	15
7	8,2	1,3	14	15
8	9,1	2,0	16	10
9	9,6	2,2	16	15
10	13	3,0	19	15
11	15,0	3,5	21	15
12	16,0	4,0	23	15
13	18,0	5,0	25	20
14	20,0	5,5	26	15
15	22,0	6,0	28	20
16	24,0	6,5	30	20
17	91,0	10,0	120	20
18	6,8	1,0	15	20
19	8,2	2,0	1,8	10
20	13,0	3,5	21	20
21	15,0	4,0	25	20
22	15,0	4,0	25	15
23	18,0	5,5	27	15
24	20,0	6,0	30	20

Таблица 8. Характеристики и параметры модели стабилитронов

Т	1 7	1	D U		$U_{cm.}$		$I_{cm.}$		Параметры модели стабилитрона		
Тип стабилитрона	$U_{cm.{\scriptscriptstyle HOM}} \ B$	$I_{cm. {\scriptscriptstyle HOM.}} \ MA$	Р _{макс.} мВт			r _{ст.} Ом			BV,	IBV,	RS,
				мин В	мах В		мин мА	мах мА	В	мА	Ом
КС130Д1	3,0	3,0	50	2,8	3,2	180	0,25	16,7	2.46	1.1	171.4
KC133A	3,3	10,0	300	2,97	3,63	65	3,0	81	2.65	3.67	62.4
KC139A	3,9	10,0	300	3,51	4,29	60	3,0	70	3.3	3.68	57.4
KC147A	4,7	10,0	300	4,23	5,17	56	3,0	58	4.14	3.67	53.4
KC156A	5,6	10,0	300	5,04	6,16	46	3,0	55	5.14	3.68	43.4
KC168A	6,8	10,0	300	6,12	7,48	7	3,0	45	6.73	3.68	4.43
KC182A	8,2	5,0	150	7,6	8,8	14	3,0	17	8.13	1.84	8.86
KC191A	9,1	5,0	150	8,5	9,7	18	3,0	15	9.01	1.84	12.86
KC196A	9,6	5,0	200	9,1	10,1	18	3,0	20	9.51	1.84	12.86
Д814Д	13,0	5,0	340	11,5	14	18	3,0	24	12.91	1.84	12.86
КС215Ж	15,0	2,0	125	13,5	16,5	70	0,5	8,3	14.86	0.736	57.16
КС216Ж	16,0	2,0	125	15,2	16,8	70	0,5	7,8	15.86	0.736	57.16
КС218Ж	18,0	2,0	125	16,2	19,8	70	0,5	6,9	17.86	0.736	57.16
КС220Ж	20,0	2,0	125	19	21	70	0,5	6,2	19.86	0.736	57.16
КС222Ж	22,0	2,0	125	19,8	24,2	70	0,5	5,7	21.86	0.736	57.16
КС224Ж	24,0	2,0	125	22,8	25,2	70	0,5	5,2	23.86	0.736	57.16
KC291A	91,0	1,0	250	86	96	700	0,5	2,7	90.3	0.37	674.3

 $U_{\it cm.ном}, I_{\it cm.ном}$ — номинальные значения напряжения и тока стабилизации стабилитрона,

 $P_{\text{мак.}}$ – максимальная рассеиваемая мощность стабилитрона,

 r_{cm} — динамическое сопротивление стабилитрона, BV — напряжение обратного пробоя стабилитрона,

IBV – начальный ток пробоя,

RS – объемное сопротивление стабилитрона.

(к Практической работе 5)

Таблица 9. Параметры схем компенсационного стабилизатора

№ варианта	E1, B	$U_{\text{вых}}, B$	R _H , OM	$\pm \Delta U_{ex}$, %
1	15	8	130	15
2	15	9	150	10
3	16	10	160	15
4	16	9	130	10
5	18	12	200	15
6	18	13	200	10
7	20	14	240	10
8	21	15	250	10
9	22	16	300	10
10	24	17	330	15
11	26	18	330	10
12	27	20	390	10
13	30	22	420	15
14	31	24	450	10
15	33	26	500	10
16	35	28	510	10
17	36	30	600	10
18	38	32	680	10
19	40	34	710	10
20	42	35	820	10
21	20	14	280	10
22	22	14	210	10
23	24	15	270	10
24	27	15	200	10

Таблица 10. Параметра моделей биполярных транзисторов

		-	Ī			
№	Обозначение	Тип	β	R_{δ} , Om	R_9 , Om	R _K , OM
варианта	транзистора	транзистора	(Bf)	(RB)	(RE)	(RC)
1	VT1	KT815A	40	2,1	0,9	0,4
	VT2	КТ315Б	60	5	2	1
2	VT1	КТ815Б	40	2	0,9	0,4
	VT2	КТ3102Ж	100	3	1	0,6
3	VT1	KT815B	40	2	0,9	0,4
	VT2	КТ315Г	60	5	2	1
4	VT1	КТ815Г	30	2,1	0,9	0,4
	VT2	KT3102A	100	3	1	0,6
5	VT1	КТ817Д	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ3102Д	200	3	1	0,6
6	VT1	КТ817Б	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	KT315E	50	5	2	1
7	VT1	KT817B	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	KT3102A	100	3	1	0,6
8	VT1	КТ817Г	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ503Б	80	2,5	1,2	0,5
9	VT1	KT831A	25	1,8	0,6	0,3
	VT2	KT3102B	200	3	1	0,6
10	VT1	КТ831Б	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ503Г	80	2,5	1,2	0,5
11	VT1	KT698A	20	1	0,5	0,2
	VT2	КТ503Д	40	2,5	1,2	0,5
12	VT1	КТ698Б	30	1	0,5	0,2
	VT2	KT503E	40	2,5	1,2	0,5
13	VT1	KT698B	50	1	0,5	0,2
	VT2	KT3102A	100	3	1	0,6
14	VT1	КТ698Г	50	1	0,5	0,2
	VT2	КТ3102Б	200	3	1	0,6
15	VT1	KT6117A	80	1,9	0,8	0,5
	VT2	KT3102B	200	3	1	0,6
16	VT1	KT6114A	80	1,5	0,8	0,4
	VT2	КТ503Б	80	2,5	1,2	0,5

№ варианта	Обозначение транзистора	Тип транзистора	β (Bf)	R _б , Ом (RB)	R _э , Ом (RE)	R _к , Ом (RC)
17	VT1	KT6110B	70	1,8	0,9	0,5
	VT2	KT3102A	100	3	1	0,6
1.0	VT1	КТ639А	40	2,4	1,5	0,7
18	VT2	KT3102B	200	3	1	0,6
19	VT1	КТ815Б	40	2	0,9	0,4
	VT2	КТ503Г	80	2,5	1,2	0,5
20	VT1	KT6117A	80	1,5	0,7	0,3
	VT2	KT315A	30	5	2	1
21	VT1	KT6117A	80	1,9	0,8	0,5
	VT2	КТ503Б	80	2,5	1,2	0,5
22	VT1	КТ639А	40	2,4	1,5	0,7
	VT2	KT315A	30	5	2	1
23	VT1	KT6110B	70	1,8	0,9	0,5
	VT2	KT503E	40	2,5	1,2	0,5
24	VT1	КТ698Б	30	1	0,5	0,2
	VT2	KT3102B	200	3	1	0,6

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.

- © Воронин А.И., 2018
- © Тановицкий Ю.Н., 2018
- © Топор А.В., 2018
- © Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018