

МУЛЬТИВИБРАТОРЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.

Схемотехника и переходные процессы.

Конспект лекций и методические указания
к выполнению лабораторных работ по курсу
импульсной и цифровой схемотехники.

Для тех, кто хочет узнать
и готов приложить некоторые усилия.

Лентяй — закрой конспект.
Он тебе не нужен.

Днепропетровск

ДНУ

2008

Содержит конспект лекций и методические указания к лабораторным работам по изучению переходных процессов в мультивибраторах на биполярных транзисторах.

Для студентов ДНУ, которые изучают основы импульсной и цифровой схемотехники, электроники и электронных устройств.

МУЛЬТИВИБРАТОРЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.

Схемотехника и переходные процессы.

Конспект лекций и методические указания
к выполнению лабораторных работ по курсу
импульсной и цифровой схемотехники.

Составители: канд. техн. наук, доц. В.Г.Письменный

Оглавление

Введение.....	4
1. Общие положения.....	5
1.1. Базовая схема. Принцип действия.....	5
1.2. Условия самовозбуждения.....	7
2. Симметричный мультивибратор на биполярных транзисторах.....	9
2.1. Автоколебательный режим. Основные расчетные соотношения.....	9
2.2. Нагруженный мультивибратор.....	16
2.3. Регулировка частоты.....	17
2.4. Повышение крутизны фронтов импульсов.....	19
2.4.1. Применение эмиттерных повторителей.....	19
2.4.2. Применение шунтирующих диодов.....	20
2.4.3. Отделение цепей заряда хранирующих конденсаторов.....	21
2.5. Обеспечение устойчивой работы мультивибраторов.....	23
2.5.1. Мультивибратор с "мягким" самовозбуждением.....	23
2.5.2. Мультивибратор с управляемым смещением.....	24
2.6. Симметричные мультивибраторы с повышенной стабильностью частоты.....	25
2.7. Особенности работы мультивибратора на биполярных транзисторах.....	29
2.7.1. Защита транзисторов от пробоя эмиттерного перехода.....	30
2.7.2. Работа транзисторов при повышенной температуре.....	32
2.7.3. Подбор транзисторов мультивибратора по частотным свойствам.....	35
2.8. Контрольные вопросы по симметричному мультивибратору в автоколебательном режиме.....	37
2.9. Пример расчета мультивибратора с коллекторно-базовыми связями.....	39
3. Ждущие мультивибраторы (одновибраторы).....	42
3.1. Заторможенный симметричный мультивибратор.....	43
3.2. Мультивибратор с эмиттерной связью Ждущий режим работы.....	47
3.3. Схемы запуска ждущего мультивибратора.....	54
3.4. Контрольные вопросы по ждущему мультивибратору.....	56
3.5. Пример расчета ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.....	57
4. Описание лабораторного макета.....	64
5. Лабораторная работа №1.....	75
6. Лабораторная работа №2.....	78
7. Лабораторная работа №3.....	80

МУЛЬТИВИБРАТОРЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Конспект лекций и методические указания к выполнению лабораторных работ.

Введение

Мультивибратором называют релаксационный генератор на базе двух каскадов усиления с глубокой широкополосной положительной обратной связью. В качестве усилительных элементов наиболее часто используются транзисторы всех видов в дискретном исполнении, обеспечивающие хорошее согласование выхода мультивибратора с различными нагрузками. По аналогичным схемам строятся и мультивибраторы в интегральном исполнении. В зависимости от элементной базы разрабатываемого устройства в качестве усилительных элементов мультивибратора могут быть также использованы операционные усилители или логические элементы. Благодаря широкополосности цепей обратной связи и работе усилительных элементов в ключевом режиме (транзистор или заперт или открыт до насыщения) мультивибраторы используются, как правило, для получения прямоугольных импульсов в широком диапазоне их параметров. Использование тех или иных усилительных элементов и схемотехнических решений определяется специфическими требованиями к параметрам генерируемых импульсов (их амплитуде, частоте повторения, стабильности, крутизне фронтов и пр.).

В предлагаемом пособии рассматриваются различные схемотехнические решения мультивибраторов на биполярных транзисторах и способы улучшения параметров генерируемых импульсов. Приведены рекомендации по выбору элементов и расчетам схем. В теоретических разделах достаточно подробно рассмотрены электрические процессы, протекающие в схемах, их причинно-следственные связи, что поможет развить логическое мышление и понимание схемотехники устройств. Приведены основные варианты схемотехнических решений.

Макет к лабораторным работам представляет собой конструктор для сборки в игровой форме и изучению работы предлагаемых устройств. Макетирование устройств начинается со сборки базовой схемы и затем к ней добавляются необходимые элементы, улучшающие работу устройства.

1. Общие положения.

1.1. Базовая схема. Принцип действия.

Мультивибратором называют релаксационный генератор на базе двухкаскадного усилителя (рис.1,а) с глубокой широкополосной положительной обратной связью. Наиболее широко мультивибраторы используют в качестве задающих генераторов, работающих в автоколебательном режиме и генерирующих симметричные П-импульсы напряжения, или в качестве ждущих генераторов П-импульсов с плавной регулировкой длительности импульса.

В качестве задающих генераторов обычно используют симметричные мультивибраторы с коллекторно-базовыми связями (рис.1,б). Принцип их действия заключается в следующем.

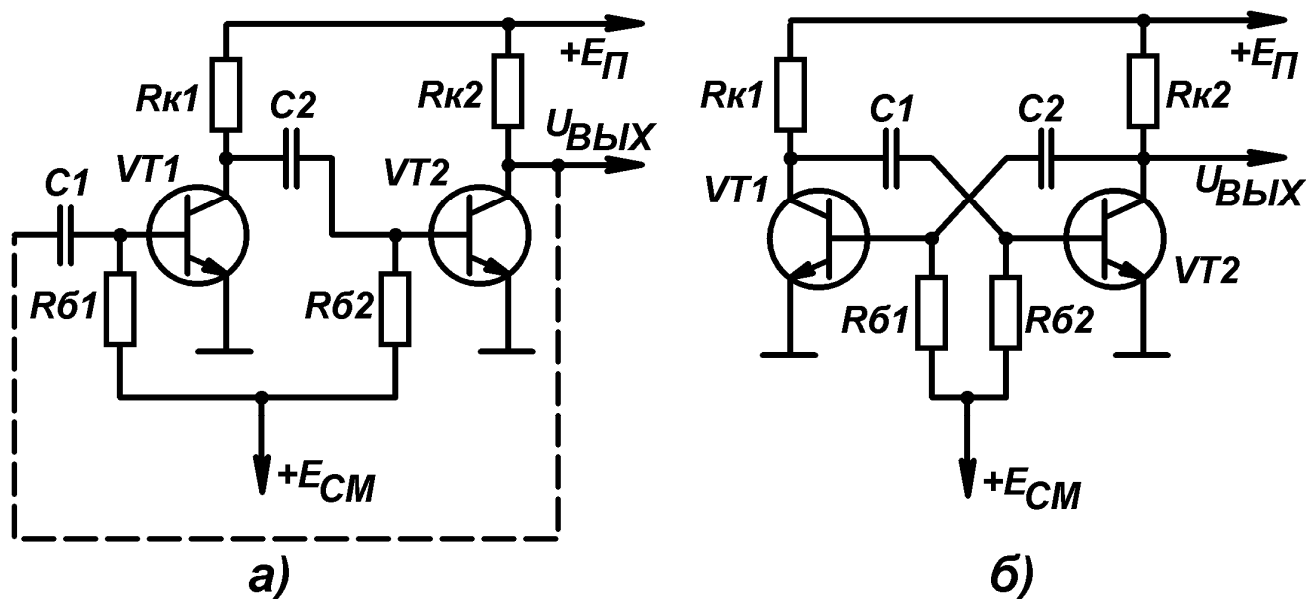


Рис.1. Принципиальная базовая схема симметричного мультивибратора на транзисторах.

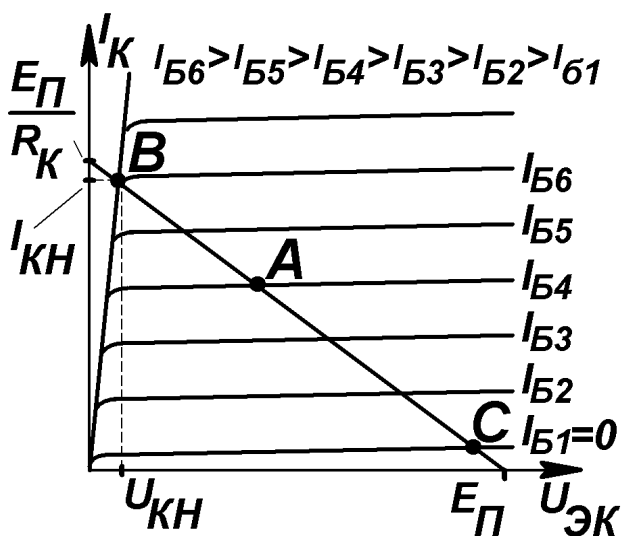


Рис.2. Положения рабочей точки транзисторов мультивибратора на их нагрузочной прямой в процессе генерирования.

Заданием соответствующих базовых токов транзисторы устанавливают в режим работы класса А, характерный высоким коэффициентом усиления усилителя (см. точка А на пересечении нагрузочной прямой усилителя с одной из коллекторных характеристик транзистора рис.2). Но при выполнении условия баланса амплитуд в этом состоянии мультивибратор долго находиться не может. Малейшая флуктуация, шумовой сигнал или помеха, будучи многократно усиленными усилителем поступая с его выхода на его же вход по цепи положительной обратной связи, приведут к увеличению тока через

один из транзисторов вплоть до его насыщения (т.В) и одновременно к запирающему второму транзистору (т.С на рис.2). Поскольку цепь обратной связи широкополосна, этот процесс развивается лавинообразно. Скорость его нарастания сдерживают лишь частотные свойства транзисторов (процессы накопления и рассасывания зарядов в их базах) и процессы перезаряда паразитных емкостей.

В результате лавинообразного опрокидывания мультивибратор входит во временно устойчивое состояние, обеспечиваемое передачей через разделительные конденсаторы C_1 и C_2 положительного или отрицательного скачков напряжения с коллекторов на соответствующие базы. Однако такое состояние также не может длиться сколь угодно долго, так как происходит перезаряд разделительных конденсаторов, приводящий к снижению величин положительного и отрицательного потенциалов на базах транзисторов и в конечном итоге к отпиранию временно запертого транзистора. При этом вновь начнет функционировать положительная обратная связь и, как только по мере выхода транзисторов из насыщенного и запертого состояний вновь начинает выполняться условие баланса амплитуд, сразу же начинает развиваться обратный лавинообразный процесс, приводящий к дальнейшему отпиранию ранее запертого транзистора вплоть до его насыщения и к запирающему ранее насыщенного транзистора.

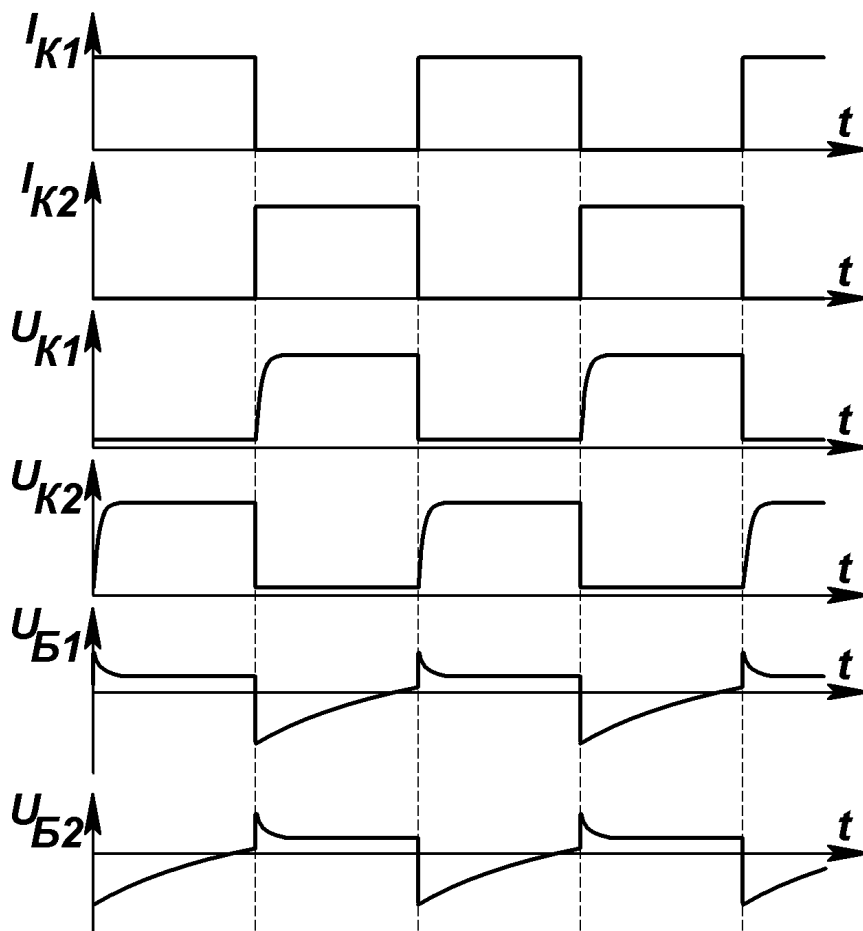


Рис.3. Упрощенные временные диаграммы работы симметричного мультивибратора на транзисторах.

Мультивибратор переходит во второе временно устойчивое состояние, продолжительность которого опять-таки определяется временами перезаряда конденсаторов C_1 и C_2 .

Временные диаграммы напряжений и токов на элементах схемы приведены на рис.3. В качестве выходных используют близкие к прямоугольным импульсы напряжения, снимаемые с коллекторов транзисторов или, реже, пилообразные - с их баз.

Симметричные мультивибраторы, как правило, используют в автоколебательном режиме для формирова-

ния непрерывной последовательности П-об-разных импульсов со скважностью Q , близкой к 2, хотя симметричный мультивибратор может быть переведен и в ждущий режим путем перевода одного из транзисторов в класс С, для чего на базу этого транзистора через резистор R_B необходимо подать отрицательное запирающее напряжение смещения. Рассмотрим подробнее количественные соотношения, определяющие характер переходных процессов в транзисторе.

1.2. Условия самовозбуждения.

Из общей теории цепей известно, что для возникновения генерации в схеме усилителя с положительной обратной связью необходимо выполнение условия баланса амплитуд, описываемое для мультивибратора выражением:

$$K_1 K_2 \beta_1 \beta_2 > 1, \text{ где:}$$

K_1, K_2 - коэффициенты усиления по напряжению первого и второго каскадов усилителя;

β_1, β_2 - коэффициенты передачи цепей положительной обратной связи между первым и вторым и вторым и первым каскадами.

В случае симметричного мультивибратора (рис.1,6)

$$K_1 = K_2 = SR_{K \text{ экв}}, \text{ где:}$$

$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_B} - \text{крутизна характеристики транзисторов в рабочей точке;}$$

$\Delta I_K = \beta \Delta I_B$ - приращение коллекторного тока, вызванное приращением разности потенциалов ΔU_B между эмиттером и базой транзистора в области рабочей точки (рис.4);

β - коэффициент усиления транзистора по току;

$R_{K \text{ экв}}$ - эквивалентное сопротивление коллекторной нагрузки транзистора.

Рассмотрим подробнее пути реализации этого условия баланса амплитуд.

В общем случае $R_{K \text{ экв}}$ должно определяться суммой сопротивлений,

подключенных к коллектору транзистора, т.е. $R_K, R_{ВХ}, R_B, Z_{СП}$, где:

$R_{ВХ}$ - входное сопротивление базовой цепи транзистора, подключенной к коллектору через разделительный конденсатор;

$Z_{СП}$ - полное реактивное сопротивление всех паразитных емкостей, шунтирующих коллекторную цепь транзистора, куда входят:

$C_{ЭБ}$ - эмиттер-базовая емкость транзистора;

$C_{БК}$ - база-коллекторная емкость транзистора;

C_M - емкость монтажа;

C_H - емкость нагрузки.

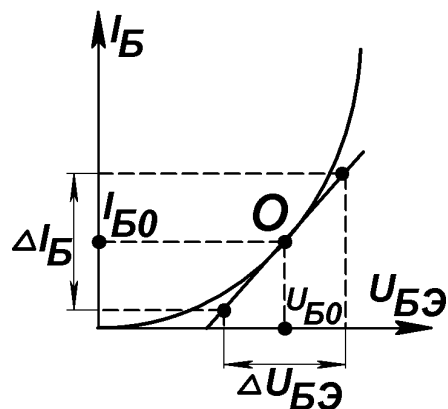


Рис.4. К определению крутизны S транзистора

Очевидно, что $Z_{СП}$ зависит от скорости переключения транзистора (скорости измене-

ния его коллекторного напряжения), поэтому учесть его влияние очень сложно. Так, при очень высокой скорости переключения ток перезаряда паразитной емкости стремился бы к бесконечности, т.е. паразитные емкости настолько сильно шунтировали бы коллекторную цепь транзистора, что его коэффициент усиления оказывался бы близким к нулю. Очевидно, со столь высокой скоростью переключение невозможно и реально оно происходит медленней. Другими словами, если без учета влияния паразитных емкостей условие баланса амплитуд выполняется, то переключение будет происходить, но со скоростью, автоматически определяемой паразитными емкостями и частотными свойствами самих транзисторов. Поэтому для простоты расчета целесообразно проверять выполнение условия без учета паразитных емкостей, влияние которых учитывают затем при нахождении длительностей фронтов генерируемых импульсов.

Входное сопротивление R_{BX} транзистора может быть найдено из соотношения

$$S = \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B}, \text{ где:} \quad (1)$$

ΔU_B - подаваемое приращение напряжения база-эмиттер вблизи рабочей точки на характеристике транзистора (рис.4);

ΔI_{B0} - величина приращения тока базы в рабочей точке при изменении напряжения на базе.

Значение ΔI_B может быть найдено по наклону касательной, проведенной к входной характеристике в рабочей точке.

Итак, если мультивибратор не нагружен, эквивалентное сопротивление коллекторной цепи может быть найдено из соотношения

$$\frac{1}{R_{K \text{ экв}}} = \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_{BX}}. \quad (2)$$

Как правило, сопротивление резистора R_B , задающее положение рабочей точки транзистора, примерно в B раз больше сопротивления коллекторного резистора и так как обычно $B \gg 1$, его влиянием также можно пренебречь. И окончательно

$$R_{K \text{ экв}} = \frac{R_K \cdot R_{BX}}{R_K + R_{BX}} = \frac{R_K \cdot \frac{\Delta U_{BЭ0}}{\Delta I_{B0}}}{R_K + \frac{\Delta U_{BЭ0}}{\Delta I_{B0}}}. \quad (3)$$

Коэффициенты передачи цепей обратной связи β_1 и β_2 в общем случае определяются коэффициентами передачи емкостных делителей напряжения, образованных конденсаторами C_1 и C_2 и входными емкостями транзисторов.

$$\beta_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_{BX2}}; \quad \beta_2 = \frac{C_2}{C_2 + C_{BX1}}. \quad (4)$$

Как правило, в низкочастотных мультивибраторах $C_1, C_2 \gg C_{BX1,2}$ и поэтому можно принять $\beta_1 = \beta_2 = 1$, а условие баланса амплитуд записать в виде

$$\frac{B\Delta I_{B0}}{\Delta U_{B0}} \cdot \frac{R_K \cdot \frac{\Delta U_{BЭ0}}{\Delta I_{B0}}}{R_K + \frac{\Delta U_{BЭ0}}{\Delta I_{B0}}} > 1. \quad (5)$$

Именно это выражение используют для проверки выполнения условий самовозбуждения рассчитанной схемы мультивибратора.

Необходимо обратить внимание на следующее. В режиме установившихся колебаний режимы работы мультивибраторов весьма сильно отличаются от рассмотренных. В стадиях временно устойчивых состоянии один из транзисторов всегда закрыт и поэтому $K_1 K_2 \beta_1 \beta_2 = 0$. Во время опрокидывания, т.е. в стадии формирования фронтов, происходит довольно быстрый перезаряд паразитных емкостей, существенно шунтирующих коллекторные нагрузки. По этой причине рабочие точки транзисторов находятся вдали от рассмотренных в квазистационарном состоянии.

Таким образом, расчет схем мультивибраторов в режиме установившихся колебаний необходимо вести, рассматривая транзисторы как ключевые элементы. Но при первом включении или возможных срывах колебаний (из-за изменения напряжения питания, уменьшения сопротивления нагрузки, нагрева или сильного охлаждения транзисторов) после восстановления рабочих условий мультивибраторы проходят именно через рассмотренные режимы, в которых и происходит их самовозбуждение с переходом в дальнейшем к генерированию установившихся релаксационных колебаний.

Ниже рассмотрим процессы, протекающие в установившемся автоколебательном режиме симметричного мультивибратора.

2. Симметричный мультивибратор на биполярных транзисторах.

2.1. Автоколебательный режим. Основные расчетные соотношения.

Типичная базовая схема симметричного мультивибратора на биполярных транзисторах n-p-n-типа приведена на рис.5, а временные диаграммы его работы в установившемся режиме - на рис.6. П-импульсы напряжения, формируемые мультивибратором, характеризуются амплитудой, длительностями импульсов $t_{и1}$, длительностями фронтов $t_{ф}$ и срезов $t_{ср}$ импульсов и периодом их повторения T .

$$T = t_{и1} + t_{и2},$$

где $t_{и1}$ и $t_{и2}$ длительности положительных импульсов напряжения, снимаемых с коллекторов первого и второго транзисторов. Если мультивибратор полностью симметричен,

$$t_{и1} = t_{и1} = t_{и}.$$

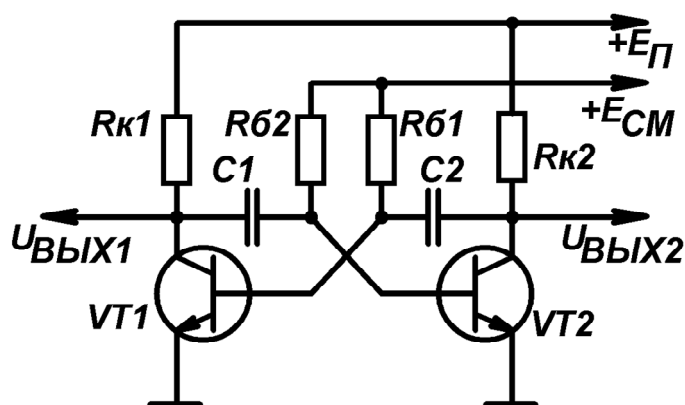


Рис.5. Принципиальная базовая схема симметричного мультивибратора на биполярных транзисторах n-p-n-типа

Для простоты рассмотрения процессов переключения, протекающих в мультивибраторе, предположим, что:

- тепловой ток $I_{к0}$ транзисторов во всем диапазоне рабочих температур много меньше токов $I_{б}$ и $I_{к}$ и в таком случае им можно пренебречь;

- транзисторы достаточно быстродействующие, т.е. времена накопления и рассасывания объемного заряда много меньше длительностей генерируемых

импульсов и поэтому ими тоже можно пренебречь;

- транзисторы находятся в насыщении в течение всего открытого состояния, т.е. в таком случае каждый транзистор можно считать почти идеальным ключом с весьма малыми токами утечки ($I_{к0}$) и малым остаточным напряжением ($U_{кн}$).

Допущенные предположения будут обсуждены в следующих разделах при выборе параметров элементов схемы мультивибратора.

Рассмотрим процессы, протекающие в схеме мультивибратора в установившемся режиме, который, благодаря глубокой положительной обратной связи, устанавливается практически сразу (за 1-2 периода колебаний) после включения питающих напряжений. Рассмотрим начнем с состояния, когда после очередного опрокидывания схемы первый транзистор оказался в насыщенном состоянии (слева от момента времени t_0 на рис.6 и через него протекает довольно большой коллекторный ток $I_{к1} = I_{кн1}$, вызванный положительным напряжением на его базе. Соответственно в этот же промежуток времени течет и достаточно большой базовый ток $I_{б1}$.

В этот же промежуток времени (слева от t_0) второй транзистор заперт, через него протекает лишь очень малый тепловой ток коллектора $I_{к0}$, практически не создающий падения напряжения на резисторе $R_{к2}$, и по этой причине потенциал коллектора второго транзистора практически равен $E_{п}$. Второй транзистор заперт отрицательным напряжением, поступающим на его базу с ранее зарядившегося конденсатора C_1 . По мере разряда конденсатора потенциал базы VT2 повышается до нулевого уровня и выше, стремясь к $E_{см}$, но как только он на 0,2 - 0,3 В превысит нулевой уровень (потенциал эмиттера), второй транзистор открывается (момент времени t_0), начинает протекать его коллекторный ток и, благодаря глубокой положительной обратной связи, начинается лавинообразный процесс опрокидывания мультивибратора, как это было рассмотрено в разделе 1 настоящего пособия.

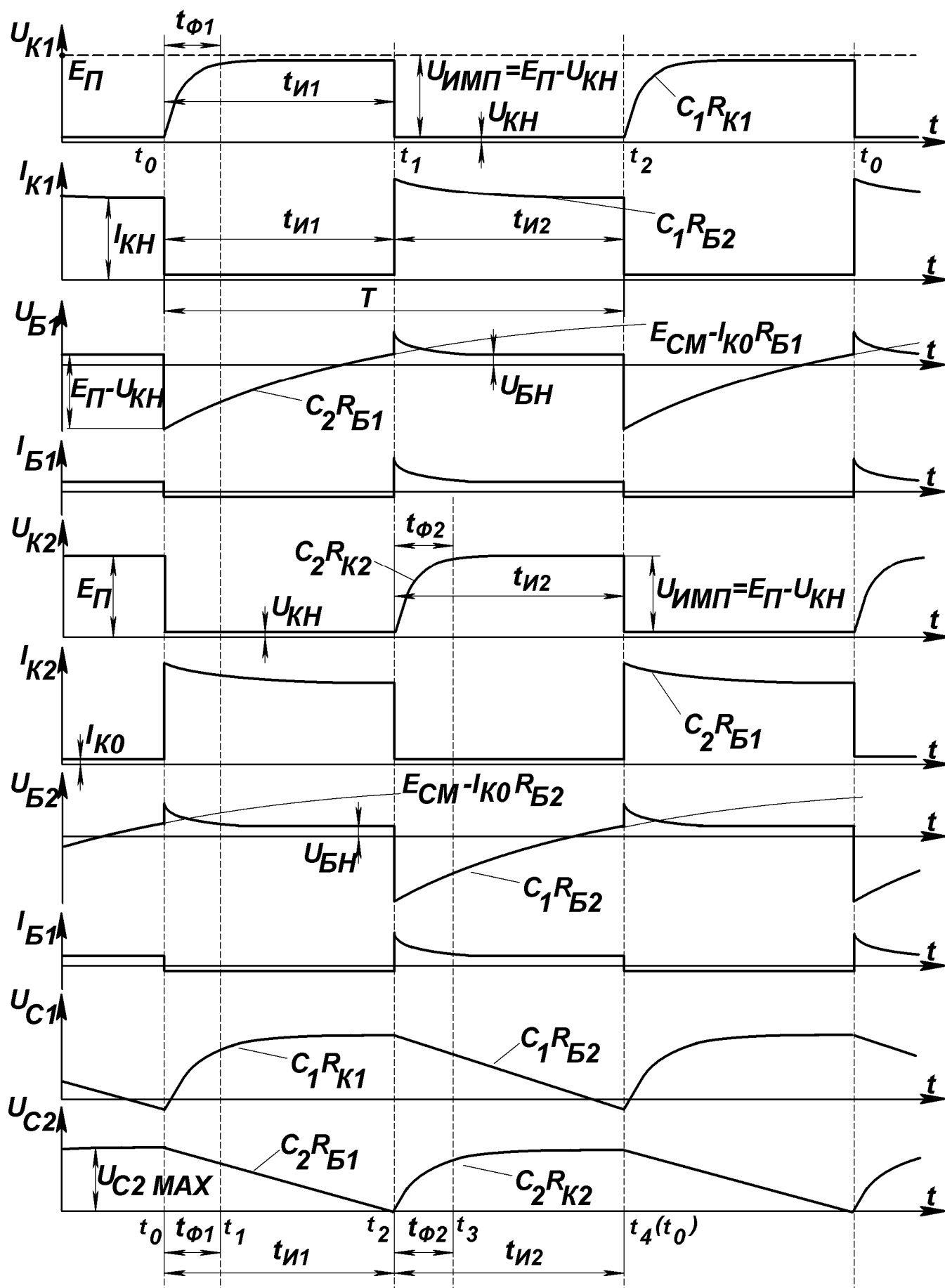


Рис.6. Временные диаграммы работы мультивибратора.
 Для наглядности рисунка масштабные соотношения
 коллекторных и базовых токов не выдержаны.

Итак, с момента времени t_0 начинается формирование очередного периода колебаний в мультивибраторе. Второй транзистор начинает открываться, через него начинает протекать коллекторный ток, вызывая падение напряжения на резисторе R_{K2} , т.е. на коллекторе второго транзистора начинает развиваться отрицательный скачок напряжения. Этот скачок через конденсатор C_2 передается на базу первого транзистора, снижая потенциал его базы и снижая соответственно его базовый и коллекторный токи. Уменьшение коллекторного тока I_{K1} приводит к уменьшению падения напряжения на R_{K1} и к повышению потенциала его коллектора. Это повышение потенциала через конденсатор C_1 передается на базу второго транзистора, вызывая увеличение его базового тока и соответственно тока коллектора. В результате второй транзистор доводится до насыщения с коллекторным током

$$I_{K2} = \frac{E_{\Pi} - U_{KH2}}{R_{K2}} \approx \frac{E_{\Pi}}{R_{K2}} \approx \frac{E_{\Pi}}{R_{K2}}, \quad (7)$$

а отрицательный скачок напряжения $\Delta U_K = E_{\Pi} - U_{KH2}$, передаваемый через C_2 на базу первого транзистора, глубоко запирает его.

В промежутке времени между импульсами (до момента времени t_0) конденсатор C_2 через резистор R_{K2} и открытый эмиттер-базовый переход первого транзистора успел зарядиться до напряжения.

$$\Delta U_{C2 \text{ макс}} = E_{\Pi} - U_{B1H} \approx E_{\Pi}. \quad (8)$$

При снижении U_{K2} от уровня E_{Π} до U_{KH2} (в момент времени t_0) весь этот скачок напряжения через C_2 передается на базу VT1, потенциал которой окажется равным

$$\Delta U_{B1 \text{ мин}} = E_{B1H} - (E_{\Pi} - U_{B1H}) \approx -E_{\Pi}, \quad \text{где} \quad (9)$$

U_{B1H} - напряжение на базе насыщенного транзистора, примерно равное 0,3 - 0,5 В, т.е. существенно меньше E_{Π} (обычно $E_{\Pi} 10 \div 30$ В).

На этом процесс опрокидывания в мультивибраторе прекращается и начинается стадия формирования положительного П-импульса на коллекторе VT1. В течение всей этой стадии второй транзистор будет открыт и насыщен током базы, поступающим (от источника положительного смещения E_{CM} через R_{B2}). Кроме того, в начале формирования П-импульса на базу VT2 через конденсатор C_1 поступает еще и часть положительного скачка напряжения с коллектора VT1, возникающего при запираии первого транзистора. Амплитуда этого скачка определяется соотношением сопротивлений R_{K1} и $r_{ЭБ2}$ - входным сопротивлением базовой цепи открывающегося транзистора. Обычно $r_{ЭБ} \ll R_K$ и поэтому величина положительного скачка на базе VT2 обычно не превышает 1-2 В.

Сразу после запираии VT1 через его коллекторный резистор R_{K1} и сопротивление $r_{ЭБ2}$ начинается заряд конденсатора C_1 практически до напряжения E_{Π} (в процессе перезаряда C_1 участвуют также резистор R_{B2} , но обычно $R_B \gg R_K$ и $r_{ЭБ}$, поэтому его влиянием можно пренебречь.

Заряжающийся конденсатор C_1 как бы шунтирует коллекторную цепь первого транзистора. Протекающий от источника питания ток, заряжающий C_1 , создает некоторое падение напряжения на R_{K1} , из-за чего потенциал коллектора VT1 при его запираии повышается не скачком, а по экспоненте с постоянной времени

$$\theta_{\phi 1} = C_1(R_{K1} + r_{ЭБ2}) \approx C_1 R_{K1}. \quad (10)$$

Именно этот процесс обуславливает длительность фронта формируемого импульса

$$t_{\phi 1} = 3\theta_{\phi 1} \approx 3C_1 R_{K1}. \quad (11)$$

Как видно из временных диаграмм рис.6, формирование коллекторного импульса на коллекторе первого транзистора длится до момента времени t_0 - момента отпираия первого транзистора, и приведет к очередному опрокидыванию схемы. Таким образом, длительность первого импульса $t_{и1}$ полностью определяется длительностью запертого состояния VT1, т.е. промежутком времени перезаряда конденсатора C_2 от напряжения $U_{C2} \approx E_{П}$ до напряжения $U_{Б1 \text{ отп}} \approx 0,2-0,3$ В. Поскольку в этом процессе участвует лишь один реактивный элемент (конденсатор C_2), процесс изменения напряжения на базе первого транзистора можно описать уравнением

$$U_{Б1}(t_{и}) = U_{Б1}(\infty) - [U_{Б1}(\infty) - U_{Б1}(0)] \cdot e^{-\frac{t_{и}}{\theta_{и1}}}, \text{ где:}$$

$U_{Б1}(0)$ – напряжение на базе в момент времени t_0 , т.е. при запираии первого транзистора;

$$U_{Б1}(0) = U_{Б1 \text{ мин}} \approx -E_{П};$$

$U_{Б1}(\infty)$ – уровень, к которому стремиться напряжение на базе по мере перезарядки конденсатора C_2 ;

$$U_{Б1}(\infty) = E_{СМ} - I_{Б0}R_{Б2} \approx E_{СМ};$$

$I_{Б0} \approx I_{К0}$ – тепловой ток коллектора закрытого транзистора;

$U_{Б1}(t)$ – напряжение на базе первого транзистора; в момент отпираия VT1 напряжение на его базе $U_{Б1}(t_{и})$ можно приравнять нулю;

$$U_{Б1}(t_{и}) \approx 0,2-0,3 \text{ В} \approx 0;$$

$\theta_{и1}$ – постоянная времени, ответственная за процесс повышения потенциала базы первого транзистора, т.е. постоянная времени перезаряда конденсатора C_2 .

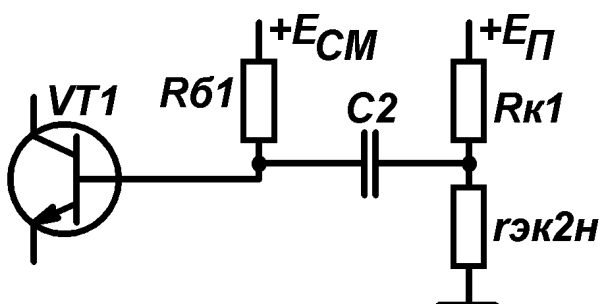


Рис.7. Эквивалентная схема цепи перезаряда конденсатора C_2 во время формирования вершины импульса на коллекторе VT1.

$r_{ЭК2H}$ – сопротивление промежутка эмиттер-коллектор второго транзистора в насыщенном состоянии.

$$\theta_{И1} = C_2 \cdot \left(R_{Б1} + \frac{R_{К2} \cdot r_{ЭК2H}}{R_{К2} + r_{ЭК2H}} \right) \approx C_2 \cdot R_{Б1}, \text{ поскольку } r_{ЭК2} \ll R_{К2}, R_{Б1}. \quad (12)$$

Длительность первого импульса может быть найдена из выражения

$$t_{И1} = \theta_{И1} \ln \frac{U_{Б1}(\infty) - U_{Б1}(0)}{U_{Б1}(\infty) - U_{Б1}(t_u)}$$

или, подставив соответствующие значения,

$$t_{И1} = C_2 R_{Б1} \ln \frac{E_{СМ} + E_{П}}{E_{СМ}}$$

Если не ставится задача регулирования длительности импульса путем изменения напряжения смещения, в качестве источника смещения используют тот же источник коллекторного питания. В таком случае

$$t_{И1} = C_2 R_{Б1} \ln 2 \approx 0,7 C_2 R_{Б1} \quad (13, а),$$

и аналогично, если схема полностью симметрична,

$$t_{И2} \approx 0,7 C_1 R_{Б2}. \quad (13, б).$$

Длительность заднего фронта (среза) импульса на коллекторе первого транзистора ($t_{СР1}$)

$$t_{СР1} \approx 3 C_{П1} r_{ЭКН1}, \text{ где} \quad (14)$$

$C_{П1}$ – паразитная емкость, шунтирующая коллекторную цепь первого транзистора, примерно равная

$$C_{П1} \approx C_{КБ1} + C_{БЭ2} + C_{БК2} + C_{М}; \text{ где}$$

$C_{КБ1}$ – емкость р-п-перехода коллектор-база первого транзистора;

$C_{БЭ2}$ – емкость р-п-перехода база-эмиттер второго транзистора;

$C_{БК2}$ – емкость р-п-перехода база-коллектор второго транзистора;

$C_{М}$ – емкость монтажа;

$r_{ЭКН1}$ – сопротивление участка эмиттер-коллектор первого транзистора в насыщенном состоянии.

Поскольку емкость $C_{П1} \ll C_1$, а сопротивление $r_{ЭК1}$ много меньше $R_{К1}$ и $R_{Б2}$, длительность заднего фронта (стадии среза) первого импульса оказывается намного меньше длительности его переднего фронта и поэтому при расчете мультивибратора не учитывается, так как его максимальное быстродействие в основном лимитируется длительностями передних фронтов импульсов. С длительностями срезов приходится считаться лишь в очень быстродействующих мультивибраторах, работающих на частотах более 10 МГц.

Итак, к моменту времени t_2 формирование положительного импульса на коллекторе первого транзистора завершилось. Потенциал базы VT1 достиг уровня 0,2-0,3 В, достаточного для начала отпирания VT1 и первый транзистор начал отпираться. Его коллекторный ток

несколько возрастает от уровня I_{K0} и при этом снижается его коллекторный потенциал. Начинаясь отрицательный скачок напряжения с коллектора VT1 через конденсатор C_1 передается на базу второго транзистора, понижая ее потенциал и тем самым его коллекторный ток. В результате уменьшается падение напряжения на резисторе R_{K2} , потенциал коллектора VT2 начинает повышаться, стремясь, в конечном итоге, к E_{Π} . Начинаясь положительный скачок напряжения с коллектора VT2 через конденсатор C_2 передается на базу VT1, увеличивая ток базы VT1 и соответственно приводя к увеличению его коллекторного тока и дальнейшему снижению потенциала его коллектора. Так начинается второй лавинообразный процесс - процесс формирования положительного импульса на коллекторе второго транзистора, который длится от момента времени t_2 до момента времени t_4 и протекает аналогично процессу формирования первого импульса. Вначале из-за шунтирующего действия конденсатора C_2 , заряжающегося через открывающийся эмиттер-базовый переход первого транзистора, по экспоненциальному закону повышается напряжение на втором коллекторе. Формируется фронт второго импульса $t_{\Phi 2}$

$$t_{\Phi 2} \approx 3\theta_{\Phi 2} \approx 3C_2R_{K1}, \text{ где} \quad (15)$$

$$\theta_{\Phi 2} = C_2(R_{K2} + r_{ЭБ1}) \approx C_2R_{K1}$$

Одновременно с началом формирования $t_{\Phi 2}$ начинает перезаряжаться конденсатор C_1 с постоянной времени $\theta_{И2}$.

$$\theta_{И2} = C_1 \cdot \left(R_{B2} + \frac{R_{K1} \cdot r_{ЭК1H}}{R_{K1} + r_{ЭК1H}} \right) \approx C_1 \cdot R_{B2}.$$

По мере перезаряда конденсатора C_1 повышается потенциал базы второго транзистора и, как только он повысится до 0,2-0,3 В, начинает отпираться второй транзистор. На этом стадия формирования импульса на коллекторе второго транзистора заканчивается. По аналогии с первым транзистором длительность второго импульса равна

$$t_{И2} = C_1 R_{B2} \ln \frac{E_{CM} + E_{\Pi}}{E_{CM}} \approx 0,7 C_1 R_{B2}.$$

Если схема полностью симметрична,

$$T = t_{И1} + t_{И2} = 1,4 R_B C. \quad (16)$$

Именно эта формула используется при инженерных расчетах симметричных мультивибраторов.

Отпирание второго транзистора автоматически приводит к запиранию первого и начинается очередной период колебаний в мультивибраторе.

Выбор номиналов компонентов схемы и методов улучшения формы импульсов обсуждены в следующих разделах.

2.2. Нагруженный мультивибратор.

Если мультивибратор нагружен, его расчет усложняется. Подключение сопротивления нагрузки непосредственно между общим проводом и коллектором, например второго транзистора (рис.8,а), приводит к изменению величины скачка напряжения на транзисторе, так как даже при закрытом транзисторе VT2 напряжение на его коллекторе будет пониженным из-за шунтирующего действия нагрузки, образующей вместе с R_{K2} делитель напряжения. Т.е.

$$U_{имп} = E_{\Pi} \cdot \frac{R_H}{R_{K2} + R_H} - U_{KH2} \approx E_{\Pi} \cdot \frac{R_H}{R_{K2} + R_H}. \quad (17)$$

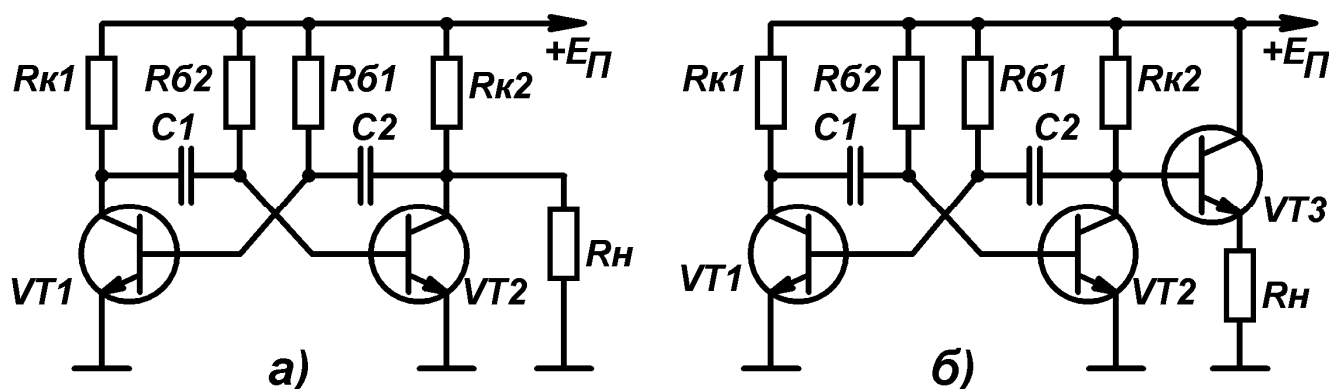


Рис.8. Схемы подключения низкоомной нагрузки к мультивибратору:
а – непосредственно к коллектору второго транзистора;
б – через эмиттерный повторитель.

Соответственно уменьшится длительность импульса $t_{и1}$ и длительность фронта импульса на коллекторе VT2.

$$t'_{и1} = R_B C \ln \frac{E_{CM} + \frac{E_{\Pi} R_H}{R_{K2} + R_H}}{E_{CM}} \quad (18)$$

$$t_{\phi 2} = 3\theta_{\phi 2} \approx 3C_2 \frac{R_{K2} \cdot R_H}{R_{K2} + R_H} \quad (19)$$

Кроме того, уменьшится коэффициент усиления второго транзистора.

$$K_2 = S \frac{R_{K2} \cdot R_H}{R_{K2} + R_H}.$$

Поэтому при необходимости возможно более полной передачи импульса желательно выбирать $R_K \ll R_H$. Однако это ведет к увеличению коллекторного тока и дополнительному нагреву R_{K2} и VT2.

Поэтому при сопротивлении нагрузки, соизмеримом или даже меньшем R_K , следует для связи нагрузки с коллектором использовать эмиттерный повторитель (рис.8,б). Коэффициент передачи повторителя по напряжению

$$K_{ЭП} = 0,9 \div 0,99,$$

а его входное сопротивление, нагружающее второй каскад,

$$R_{ВХ \text{ эп}} = (1+B)R_H.$$

Как правило, $R_{ВХ \text{ эп}} \gg R_K$ и в этом случае при выборе R_K входным сопротивлением повторителя можно пренебречь.

Если мультивибратор нагружен на емкость, это приводит к увеличению фронта импульса, так как через коллекторное сопротивление закрывающегося (в нашем примере – второго) транзистора должен произойти заряд как конденсатора C_2 , так и емкости C_H .

$$t_{\phi 2} \approx 3R_K(C_2 + C_H). \quad (20)$$

2.3. Регулировка частоты

Как видно из выражений (13) и (16), частота повторения импульсов наиболее просто может быть изменена путем изменения емкостей конденсаторов C_1 и C_2 , сопротивлений резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ или величины напряжения положительного смещения $E_{СМ}$. Рассмотрим целесообразные границы изменения этих элементов.

Емкости C_1 и C_2 можно изменять в очень широких пределах (от десятков пикофард (желательно выполнение условия $C_{1,2} \gg C_{ПАР} = C_M + C_{К6} + C_{БЭ}$) до десятков микрофард. Однако конденсаторы большой емкости (обычно электролитические) обладают повышенными током утечки, сильно изменяющимися при изменении температуры и вносящими дополнительную нестабильность в работу генератора. По этой причине в хранирующих цепях желательно использовать конденсаторы с малыми токами утечки (слюдяные, керамические, пленочные, бумажные).

Недостатком способа изменения частоты посредством изменения емкостей хранирующих конденсаторов является техническая сложность плавного изменения частоты, которое легко может быть получено путем использования переменных резисторов R_6 . Однако диапазон изменения сопротивления этих резисторов ограничен. Их уменьшение ведет к сильному насыщению транзисторов и снижению их коэффициентов усиления вплоть до срыва колебаний. Увеличение сопротивлений резисторов R_6 выводит рабочую точку транзисторов в активную область, что влечет за собой искажения формы импульсов. Так, сразу после опрокидывания открывающийся транзистор, как правило, будет находиться в насыщенном состоянии (промежуток времени $t_2 \div t_3$ на рис.9), однако по мере заряда храниющего конденсатора ток базы открытого транзистора уменьшается и транзистор может выйти из насыщения (момент времени t_3). В результате начнёт уменьшаться соответственно падение напряжения на R_K и повышается потенциал коллектора, т.е. импульс становится не вполне прямоугольным.

Кроме ухудшения формы импульсов это приводит к их дополнительной нестабильности, так как изменения температуры или напряжения источника питания при ненасыщенных транзисторах будут существенно изменять величины скачков напряжения на коллекторах

при переключении транзисторов, а следовательно, и величины отрицательных скачков напряжений на базах.

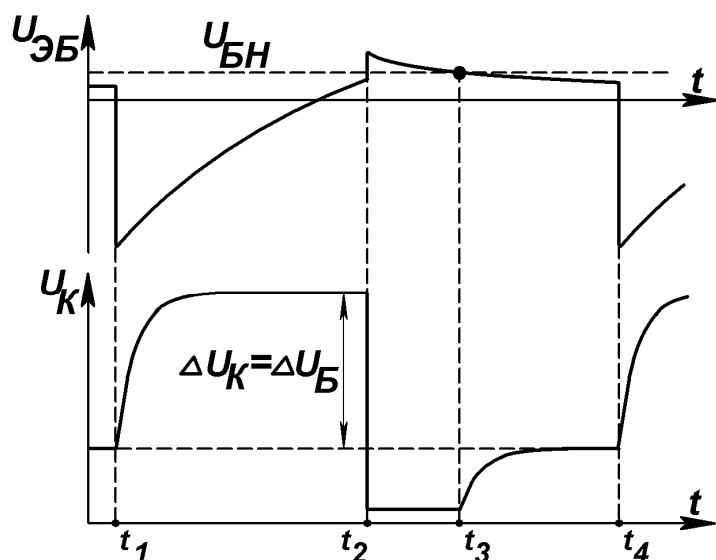


Рис.9. Временные диаграммы напряжений на элементах ненасыщенного симметричного мультивибратора.

тщательной проверки мультивибраторов на устойчивость во всех диапазонах возможных регулировок $U_{К}$, $U_{СМ}$, $C_{1,2}$, $R_{Б1,2}$, $R_{Н}$, или колебаний температуры.

Для плавной регулировки длительности импульсов (частоты повторения) в широких пределах без срывов колебаний целесообразно использовать регулируемые делители напряжения в коллекторной цепи (рис.10). Регулировка осуществляется путем изменения величины отрицательного скачка напряжения, передаваемого с коллектора на базу. Так, при перемещении ползунков резисторов $R_{К}$ вверх, к шине питания, уменьшаются величины скачков, передаваемых на базы соответствующих транзисторов. При этом уменьшаются величины напряжений $\Delta U_{Б}$, что приводит к более быстрому отпиранию транзисторов. Недостатком этого способа является сильное изменение глубины положительной обратной связи, что также чревато срывом колебаний.

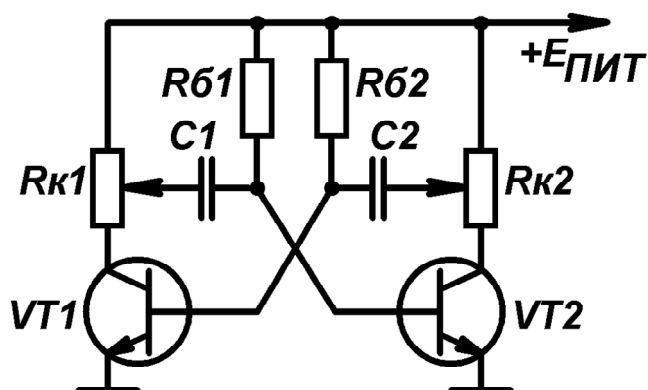


Рис.10. Симметричный мультивибратор с плавной регулировкой длительности импульсов путем изменения глубины обратной связи.

Эти же соображения ограничивают и диапазон изменения напряжения смещения - при уменьшении напряжения смещения транзисторы аналогично могут выйти из режима насыщения и опять-таки возможны искажения формы импульсов; при увеличении напряжения смещения возможен срыв колебаний из-за слишком сильного насыщения транзисторов и из-за этого - снижения коэффициентов их усиления.

Описываемые явления требуют дополнительной тщательной проверки мультивибраторов на устойчивость во всех диапазонах возможных регулировок $U_{К}$, $U_{СМ}$, $C_{1,2}$, $R_{Б1,2}$, $R_{Н}$, или колебаний температуры.

Поэтому при необходимости изменения частоты колебаний в широком диапазоне (в десятки и сотни раз) используют смешанный метод, заключающийся в дискретном изменении диапазонов посредством переключения конденсаторов и в плавной регулировке внутри каждого диапазона посредством потенциометров.

2.4. Повышение крутизны фронтов импульсов.

Из-за перезарядки хранирующих конденсаторов через коллекторные резисторы передние фронты импульсов оказываются удлиненными.

$$t_{\phi} \approx 3R_{\kappa}C.$$

Значительное уменьшение R_{κ} нецелесообразно из-за увеличения коллекторного тока транзисторов и повышенного разогрева элементов схемы. Кроме того, с уменьшением сопротивлений коллекторных резисторов снижаются коэффициенты усиления транзисторов и ухудшаются возможности выполнения условия баланса амплитуд. Уменьшение хранирующих емкостей также имеет свои пределы как из-за влияния паразитных емкостей, так и из-за нецелесообразности значительного увеличения сопротивлений базовых резисторов $R_{\text{Б}}$ для сохранения той же длительности импульсов.

В то же время на практике часто нужны именно импульсы прямоугольной формы с достаточно крутыми фронтами ($t_{\phi} \ll t_{\text{и}}$). Широко используются три способа улучшения формы импульсов:

- применение эмиттерных повторителей в цепях заряда хранирующих конденсаторов;
- применение шунтирующих диодов с источником опорного напряжения;
- отделение цепи заряда хранивающего конденсатора от цепи коллектора, с которого снимается прямоугольный импульс. Рассмотрим эти методы.

2.4.1. Применение эмиттерных повторителей.

Схема мультивибратора с эмиттерными повторителями приведена на рис 11.

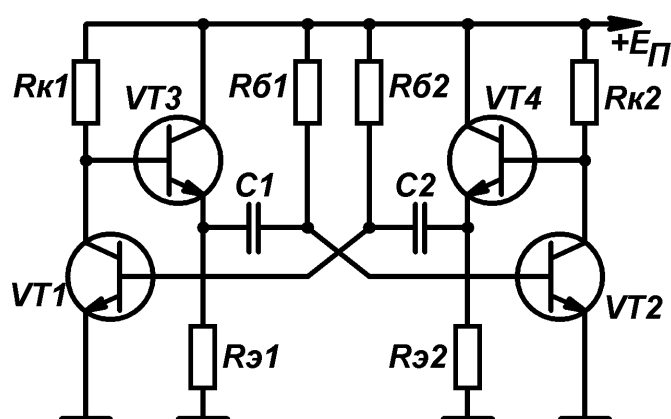


Рис.11. Принципиальная схема мультивибратора с эмиттерными повторителями в цепи обратной связи

В отличие от базовой схемы конденсаторы C_1 и C_2 подключены не непосредственно к коллекторам, а через эмиттерные повторители. Так как коэффициенты передачи повторителей близки к 1, порядок расчёта и все соотношения для данного мультивибратора остаются теми же, что и для основной схемы (рис.5). Однако к коллекторам теперь присоединены входы эмиттерных повторителей с входной ёмкостью, много меньшей хранивающей, и входным сопротивлением, намного превышающим R_{κ} .

Таким образом, процесс формирования фронта практически определяется лишь величинами сопротивлений и емкостей в коллекторных цепях транзисторов. Заряд хранирующих конденсаторов происходит

через малые выходные сопротивления эмиттерных повторителей. Преимуществом этого метода является возможность уменьшения длительностей фронтов в десятки и сотни раз.

2.4.2. Применение шунтирующих диодов.

Большая длительность фронта формируемого импульса в базовой схеме мультивибратора объясняется тем, что формирование фронта заканчивается лишь с окончанием процесса заряда храниющего конденсатора, т.е. практически при достижении коллектором потенциала источника питания $E_{П}$. Причем наиболее длительный участок фронта находится в верхней части импульса. Если используемый источник питания позволяет сформировать импульсы несколько большей амплитуды (на 30 – 60%), чем требуется, то для уменьшения длительности фронта можно использовать шунтирующие диоды, как показано на рис.12. Рассмотрим принцип действия этой схемы.

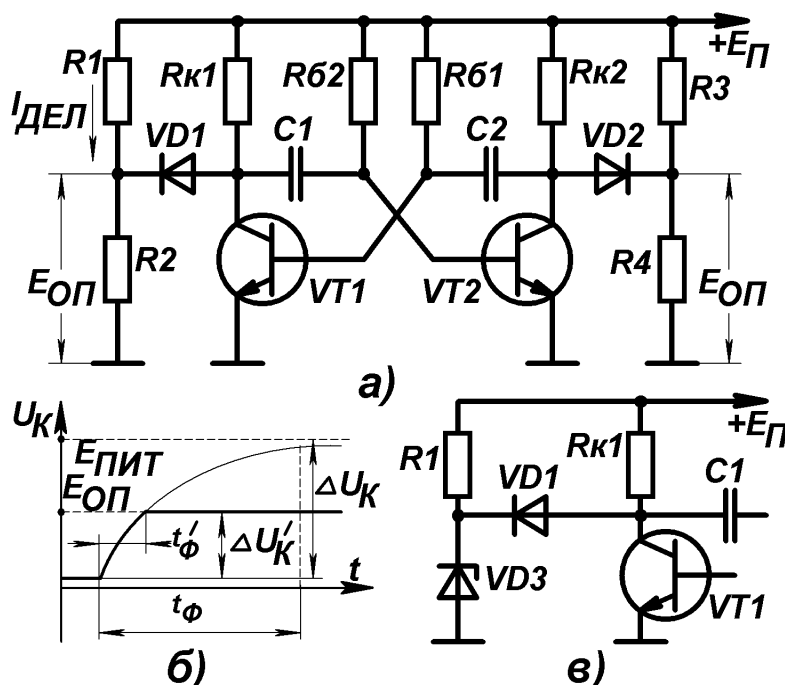


Рис.12. Мультивибратор с шунтирующими диодами:

а – принципиальная схема;

б – временная диаграмма изменения напряжения на коллекторе транзистора;

в – вариант схемы подачи опорного напряжения.

Если делитель напряжения $R1R2$ достаточно низкоомный, потенциал коллектора фиксируется на уровне, близком к $E_{оп}$. Дальнейший рост напряжения $U_{к1}$ невозможен, так как через $R_{к1}$, диод $VD1$ и сопротивление делителя $R2$ начинает протекать ток, создающий на $R_{к1}$ дополнительное падение напряжения. Процесс заряда ёмкости $C1$ на этом прекращается. В результате оставшая часть экспоненты не реализуется и длительность фронта оказывается равной

$$t'_{\phi 1} = R_{к1} C_1 \ln \frac{E_{пит} - U_{кн}}{E_{пит} - U_{оп} + U_{д}} \approx R_{к1} C_1 \ln \frac{E_{пит}}{E_{пит} - U_{оп}}, \quad (21)$$

При открытом транзисторе, например $VT1$, напряжение на его коллекторе мало ($U_{к1} \ll E_{оп}$), диод $VD1$ закрыт и схема ведёт себя так же, как базовая.

При запираии транзистора $VT1$ напряжение на его коллекторе по мере заряда конденсатора $C1$ устремится к $E_{пит}$ и начальный участок зарядной экспоненты пройдёт довольно быстро. Но как только $U_{к1}$ станет равным

$$U_{к1} = E_{оп} + U_{д},$$

диод $VD1$ открывается, его сопротивление резко уменьшается и, если

делитель напряжения $R1R2$ достаточно низкоомный, потенциал коллектора фиксируется на уровне, близком к $E_{оп}$. Дальнейший рост напряжения $U_{к1}$ невозможен, так как через $R_{к1}$, диод $VD1$ и сопротивление делителя $R2$ начинает протекать ток, создающий на $R_{к1}$ дополнительное падение напряжения. Процесс заряда ёмкости $C1$ на этом прекращается. В результате оставшая часть экспоненты не реализуется и длительность фронта оказывается равной

т.е. в несколько раз меньше, чем в базовой схеме.

Для чёткого срабатывания схемы токи через делители R_1 , R_2 и R_3 , R_4 (можно использовать один делитель, соединив вместе катоды диодов $VD1$ и $VD2$) должны быть много больше токов через R_{K1} и R_{K2} в режиме формирования импульса, т.е.

$$I_{ДЕЛ} = \frac{E_{ПИТ}}{R_1 + R_2} \gg \frac{E_{ПИТ} - E_{ОП}}{R_{K1}}.$$

Это повышает расходимый ток источника питания.

Для уменьшения нагрузки на источник питания желательно вместо резистора R_2 использовать стабилитрон с напряжением стабилизации, близким к $E_{ОП}$ (рис.12,в). В этом случае ток, протекающий через резистор R_1 , может быть равен лишь минимальному току стабилизации стабилитрона. Длительность формируемых импульсов в данной схеме определяется по методике, использованной выше. Если выбрать $E_{ОП} = 0,5E_{ПИТ}$, а $E_{СМ} = E_{ПИТ}$, то

$$t_{и} = RC \ln 1,5 \approx 0,83R_5C. \quad (22)$$

2.4.3. Отделение цепей заряда хранирующих конденсаторов.

В базовой схеме мультивибратора (рис.5) выходные П-импульсы снимаются с коллекторов транзисторов $VT1$ и $VT2$. К этим же коллекторам подключены и хранирующие конденсаторы C_1 и C_2 , заряжающиеся при запираии соответствующих транзисторов через их же коллекторные резисторы R_{K1} и R_{K2} . Этим они сильно замедляют процесс повышения до $E_{П}$ коллекторных напряжений, т.е. замедляют процессы формирования фронтов выходных П-импульсов.

$$t_{Ф1,2} = 3C_{2,1}R_{K1,2}.$$

В ряде случаев целесообразно отделить хранирующие конденсаторы от коллекторов транзисторов и создать для них специальные зарядные цепочки такие, чтобы в процессе заряда конденсаторы $C_{1,2}$ не шунтировали коллекторы транзисторов. Цель достигается разделением коллекторных нагрузок $R_{K1,2}$ на два параллельно включенных резистора $R'_{K1,2}$ и $R_{31,2}$ и включении между ними отсекающих диодов $VD1,2$ (рис.13,а).

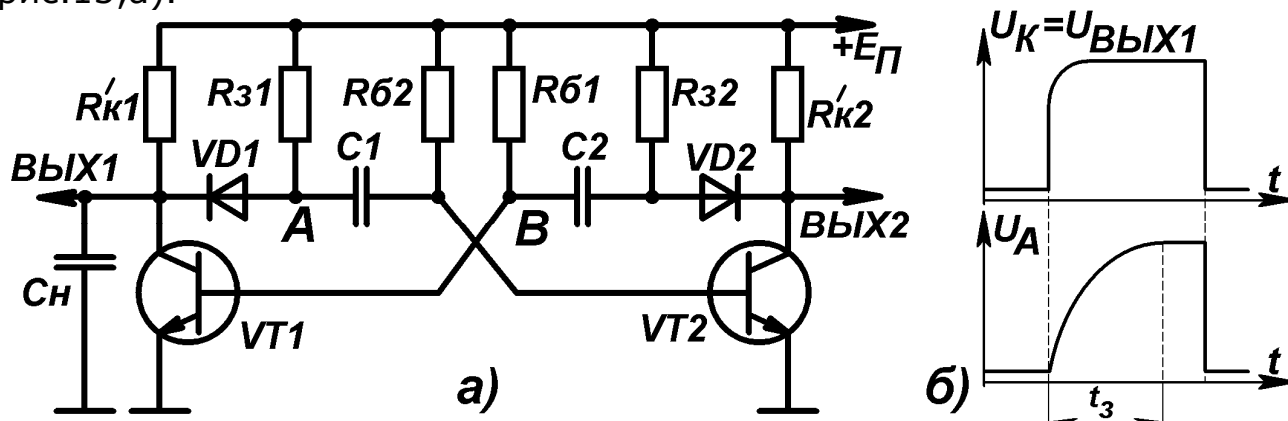


Рис.13. Принципиальная схема симметричного мультивибратора с отделением цепей заряда хранирующих конденсаторов – а) и временные диаграммы напряжений – б).

Мультивибратор работает следующим образом. При запираании транзистора, например VT1, потенциал его коллектора начинает повышаться, стремясь к E_{Π} , и при этом повышается потенциал катода диода VD1. Анод же его, подключенный к точке А, уже с первых моментов опрокидывания мультивибратора удерживается под меньшим потенциалом. Потенциал точки А по мере перезаряда C_1 также устремится к E_{Π} , но не так быстро. В результате сразу же при запираании транзистора VT1 запирается и диод VD1, отсекая точку А от коллектора VT1.

Скорость роста напряжения на коллекторе VT1 ограничивается лишь переходными процессами в самом транзисторе и процессом заряда сравнительно малых паразитных емкостей монтажа, коллектора и, возможно, нагрузки (рис.13,б).

$$t_{\phi}' = 3R_{\kappa}'(C_M + C_{\kappa} + C_H). \quad (23)$$

Хронирующий же конденсатор C_1 постепенно заряжается через зарядный резистор R_{31} и открывшийся переход эмиттер-база транзистора VT2.

$$t_3 = 5C_1 \left(R_{31} + \frac{R_{B2} \cdot r_{ЭБ2}}{R_{B2} + r_{ЭБ2}} \right) \approx 5C_1 R_{31}. \quad (24)$$

Именно это соотношение используется для выбора номинала зарядного резистора R_{31} . Коэффициент "5" выбран из тех соображений, что за время формирования импульса хронирующий конденсатор должен успеть зарядиться везможно полнее, так как от этого зависит стабильность работы мультивибратора. Другими словами, сопротивление зарядного резистора не должно быть слишком большим, чтобы хронирующий конденсатор успел зарядиться почти до E_{Π} за время формирования импульса на другом транзисторе.

С другой стороны, сопротивление зарядного резистора R_3 не должно быть слишком малым, так как при этом приходится увеличивать сопротивление резистора R_{κ}' для получения необходимого значения

$$R_{\kappa} = \frac{R_{\kappa}' \cdot R_3}{R_{\kappa}' + R_3},$$

а увеличение сопротивления R_{κ}' повлечет за собой снижение скорости заряда паразитных емкостей и увеличение длительности фронта, а также снижение коэффициента передачи напряжения импульса в нагрузку из-за увеличения ее шунтирующего действия. Компромиссное решение находится по усмотрению разработчика.

2.5. Обеспечение устойчивой работы мультивибраторов.

2.5.1. Мультивибратор с "мягким" самовозбуждением.

В рассмотренных выше схемах симметричных мультивибраторов не исключалась вероятность невозникновения колебаний, если питающее напряжение повышалось плавно и сравнительно медленно, или после срыва колебаний в результате временного уменьшения сопротивления нагрузки. При срывах колебаний оба транзистора одновременно могли попасть в приоткрытое состояние вблизи режима насыщения, в котором колебания не возникают из-за невыполнения условия баланса амплитуд. Причина - недостаточный коэффициент усиления транзисторов вблизи области насыщения. Для восстановления автоколебательного режима в таком случае необходимо какое-то внешнее воздействие, например, на мгновение разорвать базовую цепь одного из транзисторов, чем нарушить симметрию схемы, или подать внешний запускающий импульс в базу одного из транзисторов. Такой режим работы называется режимом "жесткого" самовозбуждения. Поскольку зачастую случайный срыв колебаний может нарушить работу всего устройства, в состав которого входит такой мультивибратор с "жестким" самовозбуждением, были разработаны схемы мультивибраторов с "мягким" самовозбуждением, которые в принципе не могут попасть в "жесткий" режим. Пример одного из таких мультивибраторов приведен на рис.14.

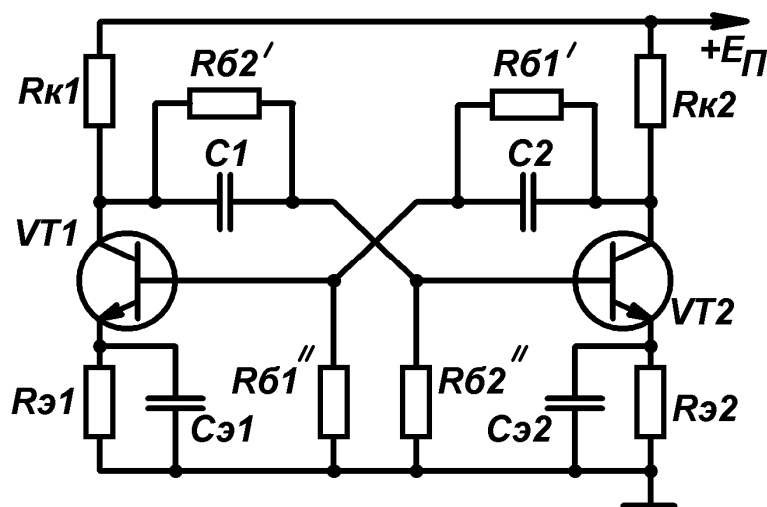


Рис.14. Принципиальная схема мультивибратора с "мягким" самовозбуждением.

"Мягкость" режима обеспечивается введением добавочных резисторов $R_{Э}$ в эмиттерные цепи обоих транзисторов, шунтированием хранирующих конденсаторов резисторами $R_{Б}'$ и соответствующим выбором номиналов резисторов $R_{к}$, $R_{Б1}'$ и $R_{Б2}''$.

Эмиттерные резисторы $R_{Э1,2}$ являются элементами отрицательной обратной связи по постоянному току и служат для удержания обоих транзисторов в активной зоне на границе режима насыщения. При подаче напряжения питания благодаря делителям напряжения $R_{Б1}'R_{Б1}''$ и $R_{Б2}'R_{Б2}''$ на базы обоих транзисторов подаются положительные напряжения смещения, снимаемые с коллекторов транзисторов и открывающие оба транзистора одновременно. С другой стороны, коллекторные токи транзисторов, протекая через $R_{Э}$, создают на них падения напряжения, повышающие потенциалы эмиттеров и тем самым снижающие разности напряжений между базами и эмиттерами. При правильном выборе номиналов резисторов $R_{Б}'$ и $R_{Б}''$ коллекторные токи снижаются до значений,

близких к I_{KH} , но при этом находящихся в активной зоне, где генерация возникает самостоятельно, как описано в разделе 1.2. Такой режим обеспечивается при $R_B' \gg R_K$ и $R_B'' \gg R_K$. Условие насыщения одного из транзисторов, когда другой закрыт, запишется в виде

$$R_B' \left(1 + B \frac{R_{Э}}{R_B''} \right) < BR_K.$$

При определении длительности импульсов в качестве R_B следует брать значение

$$R_B = \frac{R_B' R_B''}{R_B' + R_B''}.$$

Для симметричной схемы при низких значениях R_K , таких, при которых влиянием тока I_{K0} можно пренебречь ($I_{K0} R_K \ll E_{П}$), можно записать:

$$t_{И1} = t_{И2} = CR_B \ln \left[\frac{R_K}{R_B} - \frac{R_B' R_{Э}}{R_B} \right]. \quad (25)$$

Основным преимуществом рассмотренной схемы является возможность сочетания практически насыщенного режима работы с "мягким" самовозбуждением. Недостатком является то, что из-за наличия эмиттерных сопротивлений несколько снижается амплитуда П-импульсов, снимаемых с коллекторов. Кроме того, снижается температурная стабильность рабочей частоты, особенно при малых значениях $R_{Э}$.

Эмиттерные емкости $C_{Э}$ не являются принципиально необходимыми, но, шунтируя эмиттерные сопротивления, они выполняют роль ускоряющих и увеличивают броски базовых токов в моменты отпирания транзисторов, уменьшая тем самым длительности фронтов импульсов. Величины емкостей $C_{Э}$ выбирают так, чтобы они были достаточными для улучшения фронтов и, вместе с тем, успевали разрядиться в течение длительности полупериода:

$$\frac{t_{И}}{3R_{Э}} > C_{Э} \gg \frac{\tau_{\alpha}}{R_{Э}}, \quad (26)$$

где τ_{α} – граничная частота усиления транзистора.

2.5.2. Мультивибратор с управляемым смещением.

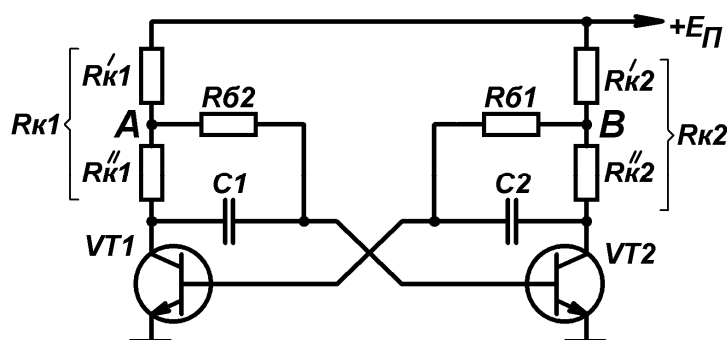


Рис.15. Мультивибратор с управляемым смещением.

На рис.15 приведена схема другого мультивибратора, работающего в режиме "мягкого" самовозбуждения, но свободного от ряда недостатков предыдущей схемы. В частности благодаря отсутствию эмиттерных резисторов наиболее полно используется питающее напряжение.

"Мягкость" режима

самовозбуждения в этой схеме обеспечивается тем, что напряжения смещения через резисторы $R_{Б1,2}$ подаются не непосредственно с шины питания $E_{п}$, а с промежуточных точек А и В коллекторных сопротивлений $R_{К1}'$ и $R_{К2}''$ и верным выбором сопротивлений $R_{Б1,2}$. При этом напряжение на базу закрытого (открывающегося) транзистора подается заниженным с части коллекторного резистора насыщенного транзистора и оказывается недостаточным для введения открывающегося транзистора в насыщенный режим. На базу же насыщенного транзистора через резисторы $R_{Б}$ и $R_{К}'$ подается практически $E_{п}$. При отпирании ранее закрытого транзистора начинает течь его коллекторный ток, создавая падение напряжения на $R_{К2}$ и тем самым выводя ранее насыщенный транзистор из насыщенного состояния. Таким образом, при опрокидывании схемы оба транзистора находятся одновременно в активных режимах, чем предотвращается срыв колебаний. Необходимо лишь так выбрать сопротивления базовых резисторов и $R_{К}'$, чтобы в активном режиме базовые токи транзисторов оказались меньше токов, способных довести транзисторы до насыщения. Этим достигается сочетание "мягкого" режима самовозбуждения с насыщенным режимом работы. Такой режим обеспечивается, если выбрать

$$(B - 1)R_{К} > R_{Б} > BR_{К}''.$$

Режим насыщения одного транзистора, когда другой закрыт, следует выбирать из условия

$$R_{Б} = (2 \div 4)(B - 1)R_{К},$$

а сопротивление $R_{К}''$ следует выбирать по возможности большим, так как уменьшение $R_{К}''$ приводит к уменьшению термостабильности схемы.

Если $R_{К}' \ll R_{Б}$, для симметричной схемы длительности импульсов могут быть определены из соотношения

$$t_{И1} = t_{И2} = CR_{Б} \ln \left[2 + \frac{R_{К}'}{R_{К}''} \right]. \quad (27)$$

2.6. Симметричные мультивибраторы с повышенной стабильностью частоты.

Во всех выше рассмотренных мультивибраторах длительности импульсов, а следовательно и период колебаний, определялись процессом перезаряда хранирующих емкостей через резисторы $R_{Б}$ и $R_{К}$. Амплитуды скачков напряжения на коллекторах, приводящих к перезаряду емкостей, напрямую зависели от стабильности источников питания ($E_{К}$ и $E_{СМ}$), величины тока $I_{К0}$ (то есть температуры транзисторов) и разброса параметров всех элементов. В результате реальная нестабильность частоты этих мультивибраторов в наиболее тяжелых условиях могла достигать 20 - 30%.

При необходимости изготовления стабильного мультивибратора имеет смысл в качестве хранирующих цепей использовать мостовые хранирующие цепи, мало зависящие от приложенного напряжения и

температуры. Пример мультивибратора с двумя мостовыми цепями в базах транзисторов приведен на рис.16.

Принцип действия мостовых хронизирующих цепей заключается в следующем. Пусть в момент времени t_1 напряжение на базе транзистора VT1 начинает понижаться до запирающего и транзистор начинает запирается. При этом уменьшается его коллекторный ток и потенциал коллектора VT1 начинает повышаться, стремясь к значению $U_{K1} = E_{\Pi} - R_{K1} I_{K0} \approx E_{\Pi}$. Это повышение через элементы второго моста $R_{M2}' C_{M2}'$ и $C_{M2}'' R_{M2}''$ передается на базу второго транзистора, открывая его. Появляется коллекторный ток I_{K2} , создающий падение напряжения на R_{K2} и соответственно снижающий потенциал второго коллектора. Это снижение через элементы первого моста $R_{M1}' C_{M1}'$ и $C_{M1}'' R_{M1}''$ передается на базу первого транзистора, ускоряя его отпирание и т.д. Благодаря положительной обратной связи опрокидывание мультивибратора из одного временно устойчивого состояния в другое происходит лавинообразно, в результате чего первый транзистор запирается, а второй доводится до насыщения. Начинается формирование положительного импульса на коллекторе VT1. При этом потенциал точки A_2 второго моста по мере заряда C_{M2}' по экспоненте повышается, стремясь к E_{Π} , а потенциал точки B_2 , скачком повысившийся до E_{Π} в момент запирающего VT1, по мере заряда конденсатора C_{M2}'' по экспоненте стремится снизиться до $U_{ЭБ2} \approx 0$.

В момент времени t_2 потенциалы точек A_2 и B_2 становятся одинаковыми и открывается диод VD2, соединив собой последовательно оба конденсатора. Поскольку в этот момент напряжения на обоих конденсаторах одинаковы и равны по $0,5E_{\Pi}$, прекращается процесс их перезаряда и следовательно становится практически равным нулю базовый ток второго транзистора. Соответственно снижается его коллекторный ток, повышается потенциал его коллектора и вновь лавинообразно происходит опрокидывание мультивибратора из второго временно-устойчивого состояния в первое. Аналогично начинается процесс формирования положительного импульса на коллекторе второго транзистора. Период повторения импульсов T равен:

$$T = (\tau_1 + \tau_2) \ln 2, \text{ где}$$

τ_1 и τ_2 – постоянные времени первого и второго мостов;

$$\tau_1 = R_{M1}' C_{M1}' = R_{M1}'' C_{M1}'';$$

$$\tau_2 = R_{M2}' C_{M2}' = R_{M2}'' C_{M2}''.$$

Для мостовой хронизирующей цепи характерно то, что момент отпирания диода и появление в связи с этим резкого скачка базового тока не зависит от внешнего питающего напряжения. Это свойство и используется для создания высокостабильных мультивибраторов.

На рис.17 представлена схема мультивибратора на дифференциальном каскаде усиления с эмиттерными повторителями и времязадающим мостом. Ценным свойством дифференциального усилителя является то, что он опять же собран по мостовой схеме на элементах $R_{K1} VT1$ и $R_{K2} VT2$ и питается током, стабилизированным транзистором VT5.

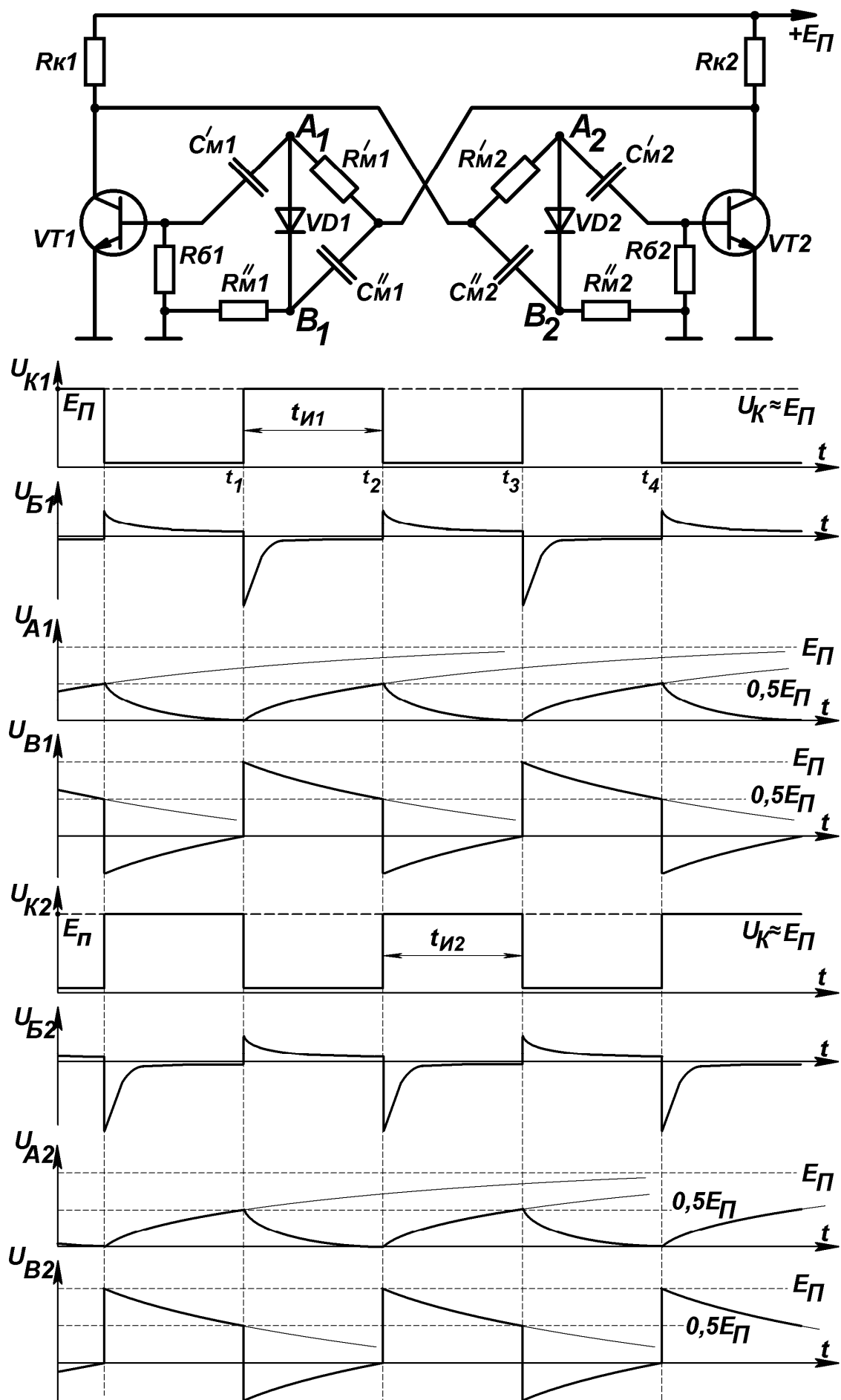


Рис.16. Принципиальная схема и диаграммы напряжений на элементах мультивибратора с базовыми времязадающими мостами.

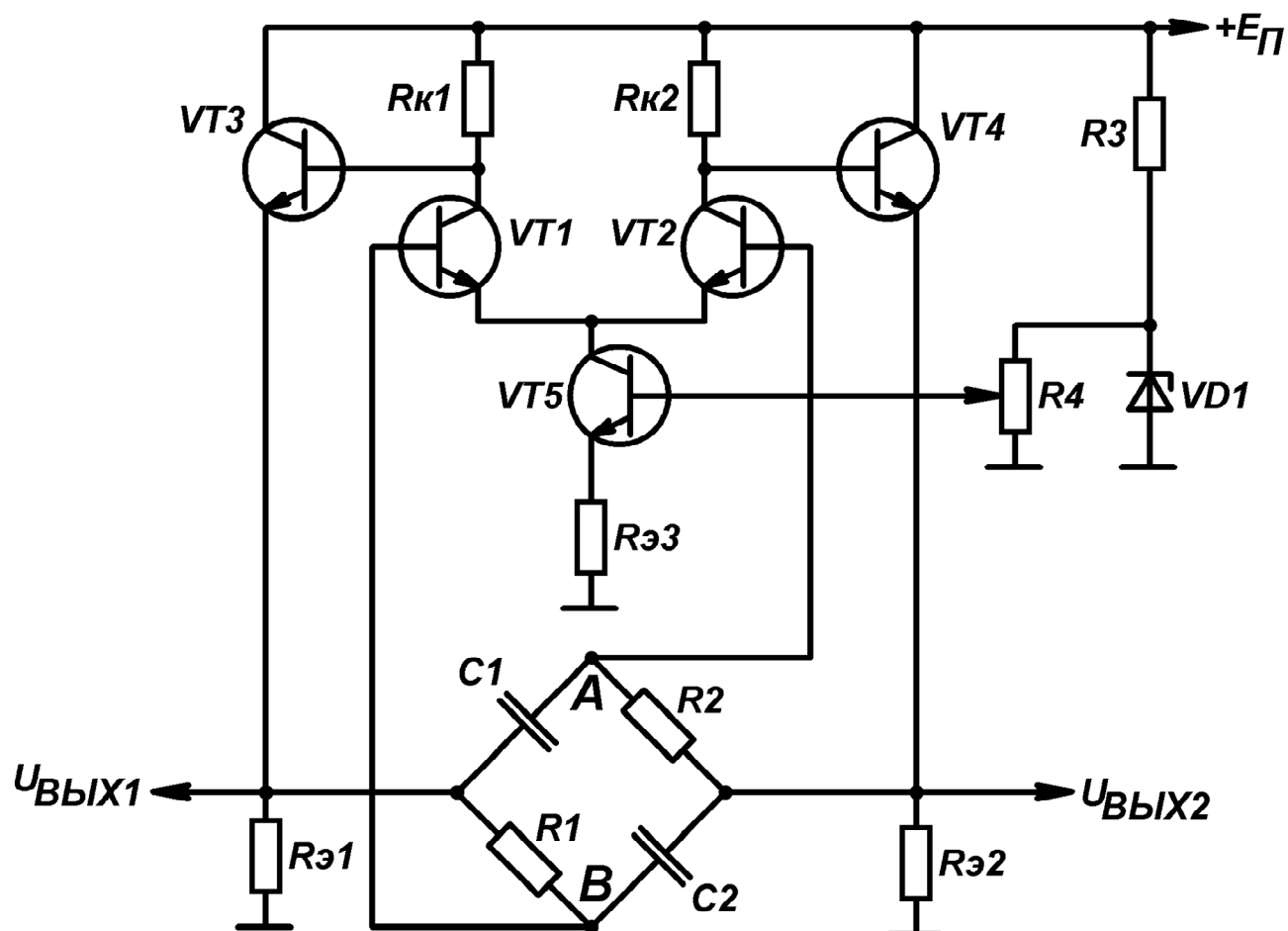


Рис.17. Мультивибратор на дифференциальном каскаде с общим времязадающим мостом.

Регулировка тока производится потенциометром R_4 , питаемым от стабилизатора напряжения на элементах R_3 , $VD1$.

Выходные напряжения с коллекторов транзисторов снимаются через эмиттерные повторители $VT3$ и $VT4$. Поскольку схема совершенно симметрична и стабилизирована, колебания температуры или питающего напряжения не приводят к ее разбалансу и обеспечивают высокий коэффициент усиления при подаче разностных напряжений на базы транзисторов $VT1$ и $VT2$.

Принцип действия мультивибратора заключается в следующем. Пусть в начальный момент времени коллекторный ток первого транзистора несколько снизится. Это приведет к повышению потенциала на коллекторе первого транзистора и соответственно на выходе первого повторителя. Это повышение через конденсатор C_1 передается на базу второго транзистора, приводя к увеличению коллекторного тока $VT2$. Соответственно снижается потенциал коллектора второго транзистора. Это снижение через второй повторитель и конденсатор C_2 передается на базу первого транзистора, запирая его. Соответственно отпирается второй транзистор и весь ток стабилизатора тока ($VT5$) устремляется через него. Схема лавинообразно переходит в первое временно-устойчивое состояние и начинается формирование положительного импульса на коллекторе первого транзистора. При этом напряжение

$U_{\text{ВЫХ1}}$ повышается почти до $E_{\text{П}}$, а напряжение $U_{\text{ВЫХ2}}$ снижается примерно до $U_{\text{К5}} = U_{\text{Э1}} = U_{\text{Э2}}$. Начинается заряд конденсатора C_1 и разряд конденсатора C_2 . По мере заряда C_1 потенциал в точке А снижается, стремясь к $U_{\text{ВЫХ1}}$, а по мере разряда C_2 потенциал в точке В повышается, стремясь к $U_{\text{ВЫХ2}}$. Когда потенциалы обеих баз VT1 и VT2 почти сравниваются, транзистор VT1 начинает отпираться, а VT2 - запирается. Благодаря положительной обратной связи вновь лавинообразно происходит процесс перехода мультивибратора во второе временно-устойчивое состояние и начинает формироваться положительный импульс на коллекторе второго транзисторе. При $C_1=C_2=C$ и $R_1=R_2=R$ скважность импульсов в точности равна $Q = 2$. Длительность импульса

$$t_{\text{И}} = RC \ln \frac{3BR_K + R_K}{BR_K + R} \quad (28)$$

где B – коэффициент усиления транзисторов по току, а нестабильность периода такой схемы не превышает единиц процентов.

2.7. Особенности работы мультивибратора на биполярных транзисторах.

При проектировании мультивибраторов следует иметь в виду, что в момент опрокидывания между электродами закрывающихся транзисторов действуют значительные перепады напряжения, существенно (до двух раз) превышающие напряжение питания, а в электродах открывающихся транзисторов имеют место скачки токов. Так, например, для базовой схемы (рис.5) максимальное напряжение между коллектором и эмиттером составляет

$$U_{\text{КЭ МАКС}} \approx E_{\text{П}}.$$

Отсюда амплитуда импульса на коллекторе составит

$$U_{1,2\text{ИМП}} = E_{\text{П}} - I_{\text{КБ}}R_{\text{К1,2}} - U_{\text{КН}} \approx E_{\text{П}}. \quad (29)$$

Максимальное обратное напряжения база-эмиттер, поступающее с коллектора открывающегося транзистора через хранирующий конденсатор, составляет

$$U_{\text{КБ МАКС}} \approx 2E_{\text{П}}.$$

Максимальный ток коллектора

$$I_{\text{К1 МАКС}} = E_{\text{П}} \left(\frac{1}{R_{\text{К1,2}}} + \frac{1}{R_{\text{Б2,1}}} \right) + \frac{E_{\text{СМ}}}{R_{\text{Б2,1}}}. \quad (29)$$

Рассмотренные обстоятельства требуют предварительного внимательно-го рассмотрения возможных максимальных значений напряжений и токов для выбранной схемы мультивибратора и, естественно, подбора типов транзисторов, обеспечивающих надежную работу схем в этих жестких условиях.

2.7.1. Защита транзисторов от пробоя эмиттерного перехода.

Для достижения высоких частот генерируемых импульсов и высокой крутизны их фронтов желательно использование высокочастотных транзисторов с малыми временами дрейфа и жизни носителей. Однако такие транзисторы имеют тонкие р-п-переходы, пробивающиеся при сравнительно низких напряжениях (от единиц или даже нескольких десятых долей вольта).

В процессе генерирования импульсов мультивибратором при заперти транзисторов на их базы через хранирующие конденсаторы с коллекторов поступают отрицательные импульсы с амплитудой, близкой к $E_{\text{п}}$, что может привести к электрическому пробоему перехода эмиттер-база. При большой емкости храниющего конденсатора в нем накапливается значительная энергия. Разряжаясь через пробившийся переход, конденсатор отдает эту энергию транзистору в виде тепла и в ряде случаев ее может оказаться достаточно для разогрева и теплового пробоя р-п-перехода. Тепловой пробой необратим и транзистор выходит из строя.

При малой емкости храниющего конденсатора тепловой пробой может не произойти. Но даже во время обратимого электрического пробоя происходит значительный быстрый разряд храниющего конденсатора, приводящий к уменьшению длительности импульсов. На рис.18 показаны возможные временные диаграммы напряжений на электродах при пробое эмиттер-базового перехода второго транзистора.

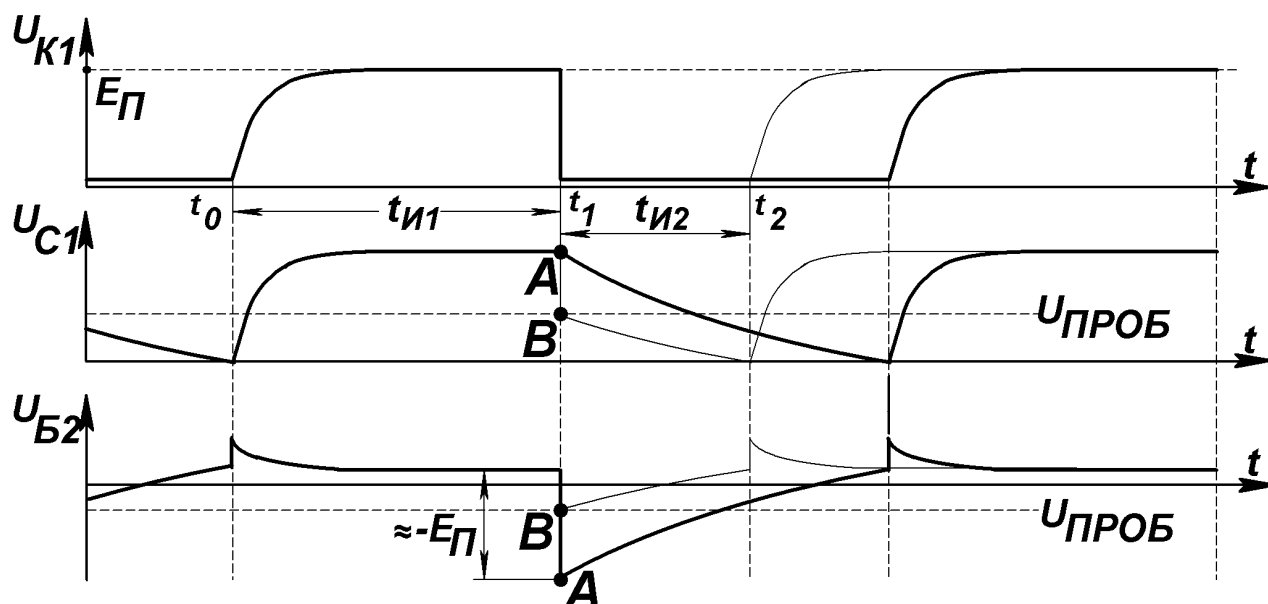


Рис.18. Временные диаграммы напряжений на элементах мультивибратора при электрическом пробое эмиттер-базового перехода второго транзистора.

Пусть в момент времени t_0 напряжение на базе второго транзистора в результате заряда конденсатора C_1 повысилось до положительного потенциала, достаточного для отпирания второго транзистора. Поскольку сопротивление открывшегося эмиттер-базового перехода второго транзистора много меньше R_{K1} и заряд конденсатора происходит довольно медленно и малым током, повышение напряжения на базе VT2 не

превышает нескольких десятых долей вольта и не приводит ни к чему плохому. Одновременно, благодаря работе цепи положительной обратной связи начинает запирается первый транзистор и к концу импульса его коллекторное напряжение повысится примерно до $E_{\text{п}}$. Так начинается формирование положительного импульса на коллекторе первого транзистора, которое продолжается до момента времени t_1 , когда потенциал первой базы превысит уровень нуля и вновь произойдет опрокидывание схемы. В результате первый транзистор откроется до насыщения, а с его коллектора через конденсатор C_1 на базу второго транзистора будет передан отрицательный скачок напряжения с амплитудой $\approx E_{\text{п}}$. Потенциал базы второго транзистора скачком понижается, стремясь к уровню $-E_{\text{п}}$ (т.А). Однако ещё при прохождении уровня пробивного напряжения (точка В) эмиттер-базовый переход второго транзистора пробьется и конденсатор C_1 мгновенно через промежуток эмиттер-коллектор первого транзистора и пробившийся эмиттер-базовый переход второго транзистора разрядятся до уровня пробивного напряжения. При этом потенциал базы второго транзистора повысится от уровня $-E_{\text{п}}$ (т.А) до уровня $-E_{\text{проб}}$ (т.В). Переход восстановится, его сопротивление повысится и дальше, как и положено, конденсатор C_1 начнет постепенно перезаряжаться через насыщенный VT_1 и резистор $R_{\text{Б2}}$. Потенциал базы VT_2 теперь уже плавно (по экспоненте с постоянной времени $\theta = R_2 C_1$) начнет повышаться, стремясь к уровню $E_{\text{см}}$ (тонкая линия на рис.18). Как только потенциал базы второго транзистора превысит уровень нуля, откроется второй транзистор, мультивибратор вновь опрокинется и вновь начнется формирование положительного импульса на коллекторе первого транзистора.

Однако из-за принудительного частичного разряда конденсатора C_1 через пробившийся э-б-переход VT_2 длительность положительного импульса на коллекторе второго транзистора окажется существенно меньше расчетной.

Так как пробивное напряжение сильно зависит от температуры перехода, изменение температуры неизбежно приводит к дополнительной нестабильности работы мультивибратора. Поэтому при использовании транзисторов с малым допустимым обратным напряжением перехода эмиттер-база следует применять меры для предохранения транзисторов от пробоя. Наиболее простым и надежным способом является включение между базой и эмиттером транзистора дополнительного шунтирующего диода, который открывается при увеличении на базе отрицательного напряжения и шунтирует переход. Однако при этом хранирующий конденсатор не может быть подключен непосредственно к базе, так как он очень быстро разрядится через открывшийся шунтирующий диод и коллекторную цепь открытого и насыщенного другого транзистора.

Схема работоспособного мультивибратора с шунтирующими диодами в базовых цепях приведена на рис.19. Как видно из рисунка, храниющие конденсаторы C_1 и C_2 подключены к соответствующим базам через добавочные резисторы R_1 и R_2 , ограничивающие токи

разряда конденсаторов. Эти резисторы, таким образом, являются элементами хронизирующих цепей, постоянные времени которых в данном случае равны

$$\theta_{И1} = C_2 \frac{R_{Б1} R_1}{R_{Б1} + R_1} = \theta_{И2} = C_1 \frac{R_{Б2} R_2}{R_{Б2} + R_2}.$$

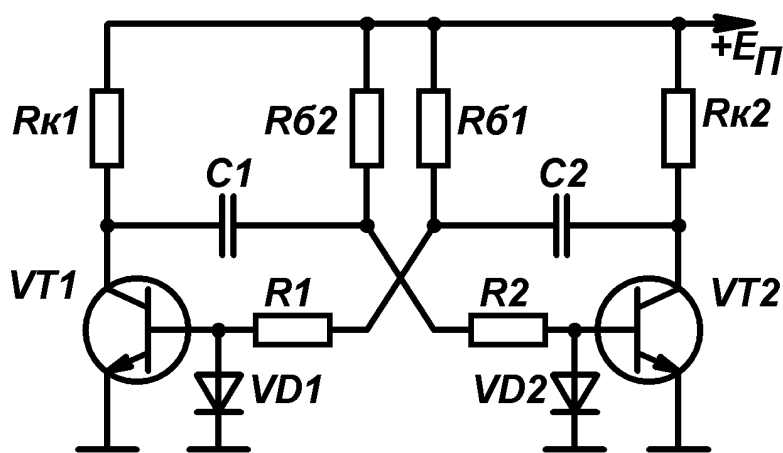


Рис.19. Симметричный мультивибратор с шунтирующими диодами в цепях баз.

Поскольку в стадии формирования импульсов базы транзисторов не свободны, т.е. их потенциалы зафиксированы диодами VD1 или VD2, при нахождении длительности импульсов следует использовать не значения потенциалов баз, а непосредственно значения напряжений на хронизирующих конденсаторах.

Длительности импульсов находятся по формулам

$$t_{И1} = C_2 \frac{R_{Б1} \cdot R_1}{R_{Б1} + R_1} \ln \frac{R_1 + R_{Б1}}{R_1}; \quad (30, а)$$

$$t_{И2} = C_1 \frac{R_{Б2} \cdot R_2}{R_{Б2} + R_2} \ln \frac{R_2 + R_{Б2}}{R_2}. \quad (30, б)$$

2.7.2. Работа транзисторов при повышенной температуре.

Из всех параметров импульсов, генерируемых мультивибраторами, наиболее сильному температурному воздействию подвержены временные параметры, а именно - длительности импульсов $t_{И}$ и период колебаний T . В различных вариантах схем зависимость этих величин от температуры проявляется по-разному, однако чаще всего она обусловлена тем, что в процессе разряда (или заряда) времязадающих конденсаторов принимают участие сильно зависящие от температуры коллекторные токи закрытых транзисторов.

Известно, что ток коллектора $I_{К0}$ изменяется при изменении температуры по показательному закону

$$I_{К0} = I'_{К0} e^{\psi(t^{\circ} - 20^{\circ})}, \quad (31)$$

где $I'_{К0}$ значение этого тока при комнатной температуре, т.е. при $t=20^{\circ}\text{C}$, t° - температура коллекторного перехода транзистора в градусах Цельсия, ψ - температурный показатель изменения теплового тока. Значение тока $I'_{К0}$ указывается в справочниках по транзисторам.

В процессе работы различных транзисторных импульсных схем транзисторы основную часть времени находятся либо в закрытом, либо

в насыщенном состоянии. Как в том, так и в другом случаях мощность, рассеиваемая в самих транзисторах, ничтожно мала. Для германиевых сплавных транзисторов превышение температуры над температурой окружающей среды составляет всего лишь 0,25 - 0,3 град/мВт. Поэтому при расчетах мультивибраторов, триггеров и многих других маломощных импульсных устройств на транзисторах в формулы вместо температуры коллекторного перехода t° , указываемой в справочниках по транзисторам, можно подставлять температуру окружающей среды.

Ток I_{K0}' , как правило, больше теплового тока, обусловленного только генерацией неосновных носителей в зоне р-п-переходов транзисторов, и имеет довольно большой разброс. Объясняется это присутствием в токе I_{K0}' компоненты, которая определяется сложными физическими процессами и, в частности, носящими случайный характер, утечками внутри кристалла, по его поверхности, а также в изоляторах. На рис.20,а показан экспериментальный график зависимости тока I_{K0} от температуры для различных транзисторов, обладающих одинаковыми значениями ψ . Исследования показывают, что графики, снятые для большого числа однотипных образцов, укладываются в сравнительно

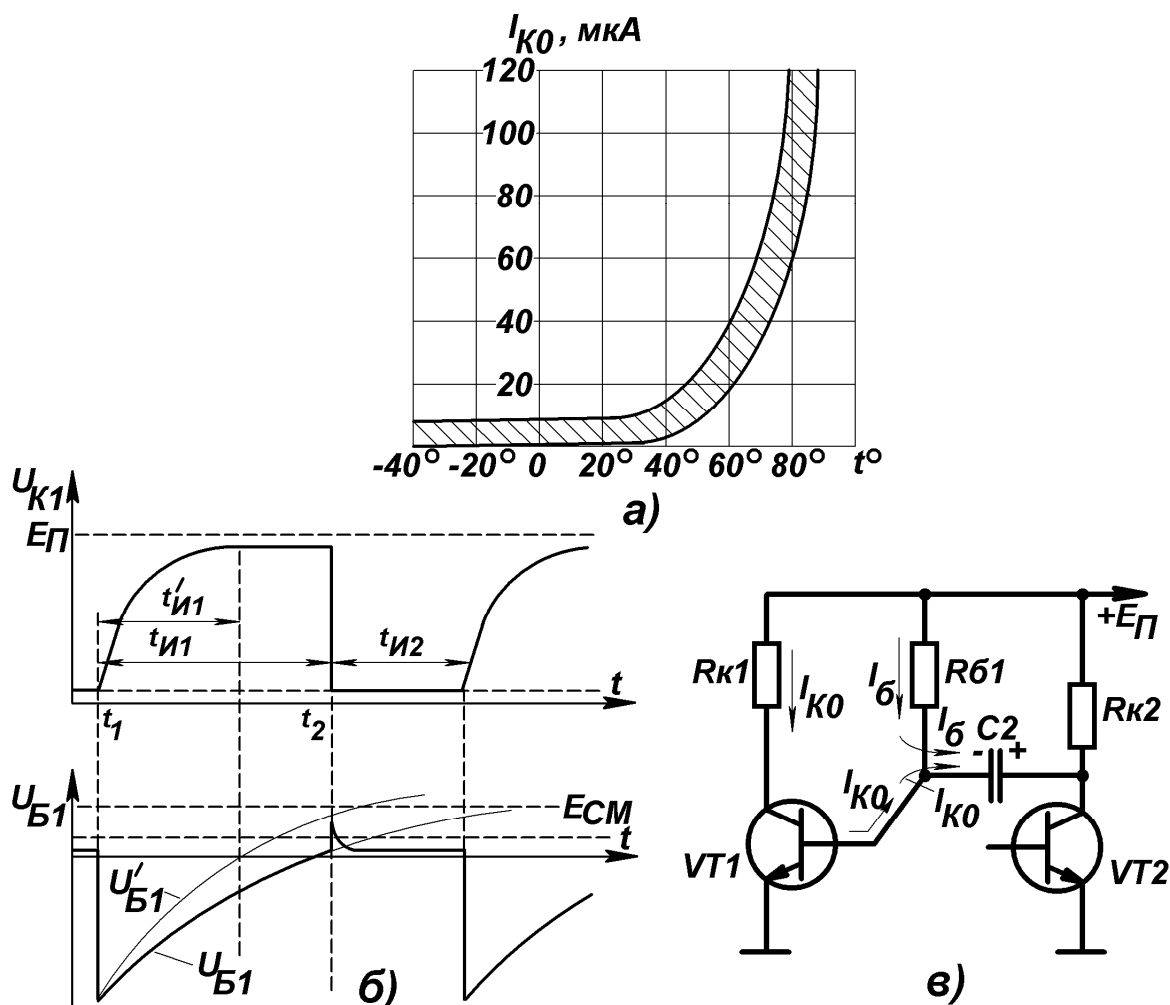


Рис.20. Усредненная область температурной зависимости теплового тока транзисторов -а); временные диаграммы напряжений на коллекторе и базе первого транзистора (рис.3) при колебаниях температуры -б); эквивалентная схема цепи перезаряда конденсатора C_2 -в).

узкой заштрихованной области, которая по своей конфигурации вполне соответствует формуле (31). Очевидно, что при расчете устройств, работающих при температуре окружающей среды 40 и более градусов Цельсия, обязательно необходим учет значений I_{K0} при повышенных температурах.

В качестве примера рассмотрим характер и степень температурной зависимости длительности коллекторных импульсов симметричного мультивибратора с коллекторно-базовыми связями (рис.5). Во время формирования положительного П-импульса на коллекторе, например, первого транзистора конденсатор C_2 разряжается и управляющее базовое напряжение изменяется по экспоненциальному закону (рис.20) от значения $U_{B1}(0) = \Delta U_{K2} \approx -E_{П}$, стремясь к значению $U_{B1}(\infty) = E_{СМ}$. Постоянная времени цепи перезаряда $\theta_{И1} = R_{B1}C_2$.

Рассмотрим подробнее процесс перезаряда (разряда) конденсатора C_2 , задающего потенциал базы VT1 во время формирования им положительного П-импульса.

Перед началом формирования импульса, т.е. до момента времени t_1 , конденсатор C_2 через открытый эмиттер-базовый переход VT1 и R_{K2} был заряжен до напряжения $E_{П} - I_{K02}R_{K2} \approx E_{П}$. При отпирании VT2 потенциал его коллектора падает до U_{KH} , т.е. практически до нуля. В результате правый вывод конденсатора C_2 окажется заземленным, а отрицательное напряжение с C_2 поступает на базу VT1, запирая его. Начинается формирование импульса на коллекторе VT1. При этом конденсатор C_2 через резистор R_{B1} разряжается током

$$I_{C2} = \frac{E_{П} + E_{СМ}}{R_{B1}} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_1}}.$$

В момент времени t_2 потенциал базы VT1 достигает нулевого уровня и транзистор VT1 начинает открываться. На этом формирование первого импульса, длительность которого равна

$$t_{И1} = C_2 R_{B1} \ln \left(1 + \frac{E_{П}}{E_{СМ}} \right),$$

заканчивается. Как уже отмечалось, эта формула справедлива для случая $R_{B1}I_{K0} \ll E_{СМ}$.

При повышенной температуре током I_{K0} пренебрегать нельзя и формула для расчета длительности импульса с учетом (31) принимает вид

$$t_{И1} = C_2 R_{B1} \ln \left(1 + \frac{E_{П}}{E_{СМ} + R_{B1} I_{K0} e^{\psi(t^\circ - 20^\circ)}} \right). \quad (32)$$

Поскольку емкость C_2 при повышенной температуре разряжается повышенным током, потенциал базы достигает нулевого уровня (тонкая линия на (рис.20,б)) раньше, раньше произойдет отпирание транзистора VT1 и, соответственно, уменьшится длительность формируемого импульса. В качестве примера в табл.1 приведена зависимость

длительности импульса симметричного мультивибратора, собранного по схеме рис.5, у которого $R_{Б1,2} = 20 \text{ кОм}$, $C_{1,2} = 0,01 \text{ мкФ}$, $E_{П} = 20 \text{ В}$, $E_{СМ} = 10 \text{ В}$.

Таблица 1

t°, C	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$t_{И}, \text{мкс}$	220	219,4	219	218	217,6	214	212	204	184
$\frac{\Delta t}{t_{И}} \%$	0	0,3	0,5	0,9	1,1	2,7	3,7	7,3	15,3

Как видно из таблицы, при работе устройства в диапазоне температур $0 \div 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при сравнительно малых базовых сопротивлениях током $I_{К0}$ смело можно пренебречь. При более высоких температурах влияние температуры становится существенным и его необходимо учитывать, применяя термостатирующие устройства или вводя в схему специальные элементы с термозависимыми параметрами, компенсирующие влияние повышения рабочей температуры.

Исследования температурной зависимости коэффициента усиления B базового тока для тех же серий транзисторов показывают, что с увеличением температуры он также растет. У транзисторов, обладающим большим значением B , степень его изменения также больше. Закон изменения $B(t^{\circ})$ также близок к показательному:

$$B = B' e^{\gamma(t^{\circ}-20)},$$

где B' - коэффициент усиления при нормальной температуре, а γ - температурный показатель изменения B . Для современных германиевых транзисторов сплавной конструкции параметр γ имеет величину порядка $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-2}$.

2.7.3. Подбор транзисторов мультивибратора по частотным свойствам.

В схеме каждого мультивибратора работают, по крайней мере, два транзисторных ключа, последовательно проходящих в процессе переключения все положенные им стадии от глубокой отсечки до состояния сильного насыщения. Это стадии: запаздывания, формирования фронта, накопления объемного заряда, рассасывания объемного заряда, формирования среза импульса. Совершенно очевидно, что длительности этих стадий, не говоря уже о таких паразитных параметрах, как емкости монтажа и нагрузки, будут в основном определять максимально возможную частоту переключения мультивибратора. Об этих стадиях переключения транзисторных ключей в описаниях работы импульсных устройств обычно не говорят. Считается, что все это сами хорошо помнят и при необходимости учитывают (переходные процессы в диодных и транзисторных ключах детально были рассмотрены в соответствующих лабораторных работах №5 и №6). В справочниках обычно указаны значения

верхних граничных частот единичного усиления транзисторов, работающих в классе А. Рассмотрим связь между верхней граничной частотой усиления транзистора f_α и длительностью генерируемых импульсов для оценки целесообразности использования в мультивибраторе транзисторов тех или иных типов.

Наиболее быстрыми процессами при формировании импульсов являются процессы формирования их фронтов. Для получения достаточно прямоугольного импульса очевидно достаточно, чтобы длительности его фронтов были на порядок меньше длительности самого импульса. Вспомним известное соотношение

$$t_{\phi 1} = \frac{0,35}{f_{ГВ}},$$

связывающее активную длительность фронта, вносимого цепью с ограниченным значением частотной характеристики ($f_{ГВ}$) с активной длительностью фронта выходного импульса при подаче на вход идеального сигнала включения. Из этого соотношения можно сделать прикидочный вывод, что для получения импульса удовлетворительной формы следует использовать транзисторы с граничной частотой усиления f_α со значением

$$f_\alpha > \frac{10 \div 20}{t_H}. \quad (33)$$

Или, для симметричного мультивибратора, со значением f_α

$$f_\alpha > \frac{20 \div 40}{T}. \quad (34)$$

2.8. Контрольные вопросы по симметричному мультивибратору в автоколебательном режиме.

1. Какие устройства называются мультивибраторами? Каковы их характерные признаки?
2. Какой режим работы называется автоколебательным?
3. Какие устойчивые состояния может иметь мультивибратор в автоколебательном режиме?
4. Как возникают колебания в мультивибраторе при первом включении? Какой транзистор оказывается насыщенным первым, почему?
5. Каким процессом определяется время закрытого состояния транзистора?
6. Каким процессом определяется время открытого состояния транзистора?
7. Почему начинает закрываться ранее открытый транзистор?
8. Почему начинает открываться ранее закрытый транзистор?
9. Какими элементами схемы определяется время открытого состояния первого транзистора?
10. Какими элементами схемы определяется время закрытого состояния второго транзистора?
11. Покажите цепи и направления токов зарядки и разрядки конденсаторов C_1 и C_2 .
12. Почему при лавинообразном переключении транзисторов длительности фронта и среза импульса не одинаковы?
13. Как можно изменить длительности генерируемых импульсов?
14. Как и почему изменение напряжения питания влияет на длительности генерируемых импульсов?
15. Как и почему изменение напряжения смещения влияет на длительности импульсов?
16. Как влияет величина напряжения смещения на стабильность частоты генерируемых импульсов?
17. Как и почему скажется подключение сопротивления нагрузки R_H непосредственно между общим проводом и коллектором одного из транзисторов на:
 - длительности генерируемых импульсов?
 - амплитуды генерируемых импульсов?
 - скважности генерируемых импульсов?
18. Как скажется подключение емкости нагрузки C_H на параметры, указанные в предыдущем вопросе?
19. Как подключить низкоомную нагрузку к коллектору транзистора в мультивибраторе?
20. Как сказываются на предельной частоте генерирования импульсов частотные свойства транзисторов?
21. Как влияют на параметры генерируемых импульсов:
 - величина коэффициента усиления транзистора по току?
 - изменение температуры окружающей среды?
 - значение верхней граничной частоты усиления транзистора?

22. По каким параметрам следует отбирать транзисторы для симметричного мультивибратора?
23. Как влияют на форму и параметры генерируемых импульсов частотные свойства транзисторов?
24. Как сказываются сопротивления базовых резисторов на форме генерируемых импульсов?
25. Как можно изменить частоту генерации симметричного мультивибратора?
26. Какие неприятности и почему можно ожидать при плавной регулировке частоты мультивибратора?
27. Как можно уменьшить длительности фронтов генерируемых импульсов? Почему фронты возникают?
28. Как можно избежать срывов генерации при плавной регулировке частоты генерирования мультивибратора?
29. Как работают мостовые времязадающие цепи? В чем их преимущество?
30. При каких обстоятельствах могут возникать пробой эмиттер-базовых переходов в биполярных транзисторах?
31. Как можно избежать пробоев эмиттер-базовых переходов в транзисторах?

2.9. Пример расчета мультивибратора с коллекторно-базовыми связями.

Любое устройство разрабатывают и изготавливают для решения конкретной задачи. В процессе работы наше устройство будет нагружено каким-то исполнительным элементом и естественно должно вырабатывать сигналы в соответствии с требованиями этого элемента, так как любое изменение параметров нагрузки или условий работы обязательно влечёт за собой изменение элементной базы, а возможно и изменение схемотехнического решения. Очевидно, от этого исполнительного элемента следует начинать расчёт.

Пусть нам необходимо изготовить мультивибратор для генерирования тактовых импульсов, управляющих распределительным устройством, создающим «бегущие огни» в гирляндах новогодней ёлки.

Пусть для управления этим распределительным устройством необходимы импульсы со следующими параметрами:

- амплитуда импульсов $U_{\text{имп}} = 5-6 \text{ В}$;
- период повторения импульсов $T = 1 \text{ мс}$ (или частота повторения $F \sim 1 \text{ кГц}$, или длительности импульсов t_1 и t_2);
- входное сопротивление распределительного устройства, нагружающее выход мультивибратора $R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$;
- фронты импульсов должны быть не более $0,1t_{\text{и}} = 0,1 \frac{T}{2} = 50 \text{ мкс}$.

Для генерирования таких импульсов желательно использовать простейшее устройство, например симметричный автоколебательный мультивибратор, собранный по базовой схеме рис.5. Он прост, удобен в регулировке, может быть собран из доступных деталей.

Произведём расчёт в следующем порядке, хотя в зависимости от имеющихся комплектующих или других обстоятельств порядок расчета может быть изменен по усмотрению разработчика.

1. Выбираем напряжение питания $E_{\text{п}}$. Для большинства схем оно должно быть на 10-30% больше $U_{\text{имп}}$. Это обеспечит свободу в выборе параметров элементов и в настройке. Для схем рис.8 и рис.10 оно выбирается в пределах $1,5 \div 2,5 E_{\text{п}}$.

$$E_{\text{п}} = 1,3 U_{\text{имп}} = 1,3 \cdot 6 \text{ В} = 7,8 \text{ В}.$$

Если в будущем устройстве, например в распределительном устройстве, уже запланирован блок питания с напряжением, например, 12,6В, есть смысл воспользоваться им, тем более, что мультивибратор много тока не потребит. Не создавать же специально для него блок питания с напряжением 7,8 В. Итак, будем считать выбранным напряжение питания $E_{\text{п}} = 12,6 \text{ В}$.

2. Выберем тип транзисторов, для чего определим максимальные значения $U_{\text{кэ макс}}$, $U_{\text{кб макс}}$, $U_{\text{бэ макс}}$. Из схемы и временных диаграмм рис.8 следует, что в данном случае указанные напряжения могут быть не более

$$U_{\text{кэ макс}} \leq E_{\text{п}} = 12,6 \text{ В};$$

$$U_{БЭ \text{ МАКС}} = -(E_{П} - U_{КН}) \approx -E_{П} = -12,6 \text{ В};$$

$$U_{КБ \text{ МАКС}} = U_{КЭ \text{ МАКС}} + |U_{БЭ \text{ МАКС}}| \leq 2E_{П} = 25 \text{ В}.$$

3. По заданной рабочей частоте $F = 1 \text{ кГц}$ из (34) определяем расчётную граничную частоту усиления транзисторов.

$$f_{\alpha} > \frac{20 \div 40}{T} \approx 30F = 30 \cdot 1 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 30 \text{ кГц}.$$

При расчете мультивибратора с $t_{и1} \neq t_{и2}$ предельную рабочую частоту определяют из (33) по минимальной длительности импульса.

Если предполагается регулировка частоты мультивибратора в широком диапазоне, то в (34) необходимо подставить значение высшей генерируемой частоты.

4. Полученные максимальные значения напряжений на электродах и расчётная граничная частота позволяют выбрать подходящий транзистор. При этом предельно допустимые напряжения выбранных транзисторов должны быть по крайней мере на 20-30%, а их граничная частота - в 1,5 ÷ 2,5 раза выше расчётной.

На этом этапе коэффициент усиления по току при выборе транзистора можно не учитывать, так как современные транзисторы имеют достаточно высокие коэффициенты усиления и могут быть использованы практически все.

На основании найденных минимально допустимых значений f_{α} , $U_{КЭ}$, $U_{БЭ}$, $U_{КБ}$ и с учетом имеющихся транзисторов по справочнику находим транзистор типа П307В с параметрами:

- граничная частота коэффициента передачи $f_{\alpha} \geq 20 \text{ МГц}$;
- коэффициент передачи тока $\beta = 50 \div 150$;
- обратный ток коллектора $I_{К0} \leq 3 \text{ мкА}$;
- максимально допустимое напряжение эмиттер-база $U_{КЭ \text{ МАКС}} = 120 \text{ В}$;
- постоянный ток коллектора $I_{К \text{ МАКС}} \leq 30 \text{ мА}$;
- постоянная рассеиваемая мощность при $T^{\circ}\text{C} = 293\text{К}$ $P_{\text{МАКС}} = 250\text{мВт}$;

5. Выберем коллекторные сопротивления $R_{К}$. При малых значениях выбранных $E_{П}$ для получения импульса максимально возможной величины следует выбрать $R_{К} \ll R_{Н}$, а именно $R_{К} \approx 0,5 \text{ кОм}$.

Однако в нашем случае имеется некоторый запас по напряжению питания. Поэтому, руководствуясь (17)

$$\Delta U_{К2} = E_{П} \frac{R_{Н}}{R_{К2} + R_{Н}} - U_{КН2} = U_{Н},$$

можно найти $R_{К \text{ МАКС}}$ из соотношения

$$R_{К2} \leq \frac{E_{П} R_{Н} - (U_{ИМП} + U_{КН}) R_{Н}}{U_{ИМП} + U_{КН}} = \frac{12,6 \cdot 5 \cdot 10^3 - (6+1) \cdot 5 \cdot 10^3}{6+1} = 4,05 \text{ кОм}$$

По таблице номинальных значений серийно выпускаемых резисторов находим $R_{К2} = 3,9 \text{ кОм}$. Сопротивление $R_{К1}$ выбираем таким же.

При этом коллекторные токи обоих транзисторов

$$I_{K1,2} = \frac{E_{\Pi} - U_{KH}}{R_{K1,2}} = \frac{12,6 - 1}{3,9 \cdot 10^3} \approx 3 \text{ мА} \ll I_{K\text{МАКС}}.$$

6. Выберем номиналы базовых резисторов $R_{Б1,2}$. Они должны создать необходимый базовый ток, чтобы обеспечить степень насыщения транзисторов $N = 2 \div 3$. При меньшем насыщении мультивибратор легко входит в автоколебательный режим, но изменение температуры может привести к нестабильности в работе. При большой степени насыщения велика опасность срыва колебаний, что также нежелательно. Итак, токи баз должны быть равны

$$I_{Б1,2} = 2,5 \frac{I_{K1,2}}{B_{\text{МИН}}}.$$

Ток базы задается величинами $R_{Б}$ и $E_{СМ}$.

$$I_{Б1,2} \approx \frac{E_{СМ}}{R_{Б1,2}} \text{ и в нашем случае } I_{Б1,2} \approx \frac{E_{\Pi}}{R_{Б1,2}} = 2,5 \frac{I_{K1,2}}{B_{\text{МИН}}}.$$

Отсюда можно найти $R_{Б}$.

$$R_{Б1,2} \approx \frac{B_{\text{МИН}} \cdot E_{\Pi}}{2,5 \cdot I_{K1,2}} = \frac{50 \cdot 12,6}{2,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \approx 82 \text{ кОм}.$$

Проверим выполнение условия $E_{СМ} \gg I_{K0} R_{K0} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 82 \cdot 10^3 = 0,24 \text{ В}$, откуда видно, что некоторые колебания температуры в пределах комнатной не приведут к существенному изменению частоты колебаний.

Рассчитаем емкости хронизирующих конденсаторов. Если мультивибратор не нагружен, величины C_1 и C_2 могут быть определены из соотношений (13,а) и (13,б).

$$C_1 = 1,3 \frac{t_{И2}}{R_{Б2}}; \quad C_2 = 1,3 \frac{t_{И1}}{R_{Б1}}.$$

В нашем случае к коллектору второго транзистора подключено сопротивление нагрузки $R_{Н}$, в связи с чем уменьшается величина отрицательного скачка напряжения на коллекторе VT2. Это вызовет уменьшение длительности импульса на коллекторе первого транзистора или потребует увеличения емкости C_2 в соответствии с выражением (18,а).

$$t_{И1} = R_{Б1} C_2 \ln \frac{E_{СМ} + \frac{E_{\Pi} R_{Н}}{R_{К2} + R_{Н}}}{E_{СМ}}.$$

Подставив значения $t_{И1} = t_{И2} = 0,5 \text{ мкс}$ и $R_{Б1} = R_{Б2} = 82 \text{ кОм}$, найдём

$$C_2 = \frac{t_{И}}{R_{Б1} \ln \frac{E_{СМ} + \frac{E_{\Pi} R_{Н}}{R_{К2} + R_{Н}}}{E_{СМ}}} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{82 \cdot 10^3 \cdot \ln \frac{12,6 + 12,6 \cdot 5 \cdot 10^3}{3,9 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3}} = 7,6 \text{ нФ}.$$

$$C1 = \frac{t_{H2}}{R_{B2}} = \frac{1,3 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{82 \cdot 10^3} = 8 \text{ нФ}.$$

8. Поскольку все параметры элементов мультивибратора рассчитаны, необходимо произвести проверку длительности фронтов импульсов. В выражение (19) подставим значения R_{K2} , R_H и C_2 и рассчитаем длительность фронта $t_{\phi 2}$.

$$t_{\phi 2} = 3\theta_{\phi 2} \approx 3C_2 \frac{R_{K2} \cdot R_H}{R_{K2} + R_H} = 3 \cdot 7,6 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{3,9 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^3}{4,5 \cdot 10^3} = 98 \text{ мкс}.$$

Как следует из результатов проверки, длительность фронта оказывается вдвое больше заданной. Если с фронтом такой длительности можно согласиться (исходя из потребностей нагрузки), то расчёт мультивибратора можно считать законченным. Если же длительность должна быть уменьшенной до 50 мкс, следует внести изменения в схему по одному из возможных вариантов и вновь пересчитать мультивибратор в соответствии с новым техническим решением.

Вариант 1. Вдвое уменьшить сопротивления коллекторных нагрузок $R_{K1,2}$. При этом уменьшатся постоянные времени перезаряда хранирующих конденсаторов (см. раздел 2.1, соотношение (11)). Соответственно придётся пересчитать $R_{B1,2}$ или работать с большим коэффициентом насыщения N транзисторов.

Вариант 2. Применить эмиттерные повторители (рис.11), позволяющие в десятки раз уменьшить длительности фронтов.

Вариант 3. Поскольку имеется запас по напряжению $E_{п}$, применить шунтирующие диоды (рис.12) и в несколько раз уменьшить длительности фронтов.

Наименее приемлемым следует считать вариант 1, поскольку он приводит к увеличению степени насыщения транзисторов и к возможным срывам колебаний.

Варианты 2 и 3 не потребуют пересчёта всей схемы мультивибратора и позволяют уменьшить длительности фронтов лишь путём добавления нескольких деталей.

3. Ждущие мультивибраторы (одновибраторы).

Под одновибратором понимают релаксационный генератор, имеющий одно устойчивое (ждущее) состояние, в котором он может находиться сколь угодно долго, и переходящий во временно устойчивое состояние под действием входного (запускающего) импульса. Во временно устойчивом состоянии одновибратор на каждый запускающий импульс генерирует лишь один выходной импульс с параметрами, определяемыми схемными параметрами мультивибратора, и самостоятельно возвращается в исходное состояние. Такие генераторы часто используют в устройствах, где необходима независимая регулировка периода повторения коротких запускающих импульсов, вырабатываемых релаксационным генератором в автоколебательном режиме, и независимая регулировка параметров (длительности) импульсов, вырабатываемых ждущим мультивибратором.

3.1. Заторможенный симметричный мультивибратор.

Любой релаксационный генератор может быть переведен в ждущий режим путём подачи запирающего напряжения смещения на управляющий электрод усилительного элемента (в нашем случае на базу одного из транзисторов). Схема заторможенного симметричного мультивибратора приведена на рис.21,а. Мультивибратор находится в устойчивом состоянии сколь угодно долго благодаря тому, что на базу первого транзистора подано отрицательное напряжение смещения, надёжно запирающее его, а на базу второго транзистора - положительное напряжение смещения от шины питания, поддерживающее второй транзистор в устойчивом открытом (желательно насыщенном) состоянии. При этом конденсатор C_1 заряжен почти до напряжения питания

$$U_{C2} = E_{\Pi} - U_{ЭБ2} \approx E_{\Pi},$$

а конденсатор C_2 - до напряжения

$$U_{C1} = -(E_{СМ} + U_{КН2}).$$

В принципе, при использовании биполярных транзисторов источник отрицательного напряжения можно не использовать, просто подключив резистор $R_{Б1}$ к общему проводу. Если это так, то в заторможенном состоянии конденсатор C_2 окажется практически разряженным.

$$U_{C2} = U_{КН2} \approx 0.$$

Запуск мультивибратора может быть осуществлен путем подачи короткого положительного импульса напряжения на базу VT1. Если амплитуда импульса превышает сумму напряжений $|E_{СМ}| + U_{Д}$ (рис 21,б), первый транзистор открывается и через него начинает течь коллекторный ток, создающий на $R_{К1}$ некоторое падение напряжения. Отрицательный скачок потенциала с коллектора VT1 через конденсатор C_1 передается на базу VT2 и запирает его. На его коллекторе возникает

положительный скачок потенциала, передаваемый через конденсатор C_2 на базу первого транзистора, насыщая его и в течение некоторого промежутка времени поддерживая в насыщенном состоянии. Выход мультивибратора из временно устойчивого состояния может произойти двумя путями (см. рис.21,б).

Путь 1. При переходе мультивибратора во временно устойчивое состояние потенциал коллектора VT2 устремляется к уровню $E_{\text{п}}$, конденсатор C_2 начинает перезаряжаться по цепи $R_{\text{к}2} - C_2 - r_{\text{эб}1}$, где $r_{\text{эб}1}$ – сопротивление открытого и насыщенного эмиттер-базового перехода первого транзистора. По мере перезаряда конденсатора C_1 ток базы VT1, а соответственно и потенциал базы, будут снижаться. Как только первый транзистор выйдет из насыщения, его коллекторный ток начнет уменьшаться, а потенциал коллектора устремиться к $E_{\text{п}}$. Этот положительный скачок с коллектора VT1 передается на базу VT2, отпирая его. Соответственно по цепи положительной обратной связи (через конденсатор C_2) на базу VT1 подается отрицательный скачок напряжения, способствующий быстрому запирающему VT1. На этом в момент времени t_1 формирование импульса заканчивается.

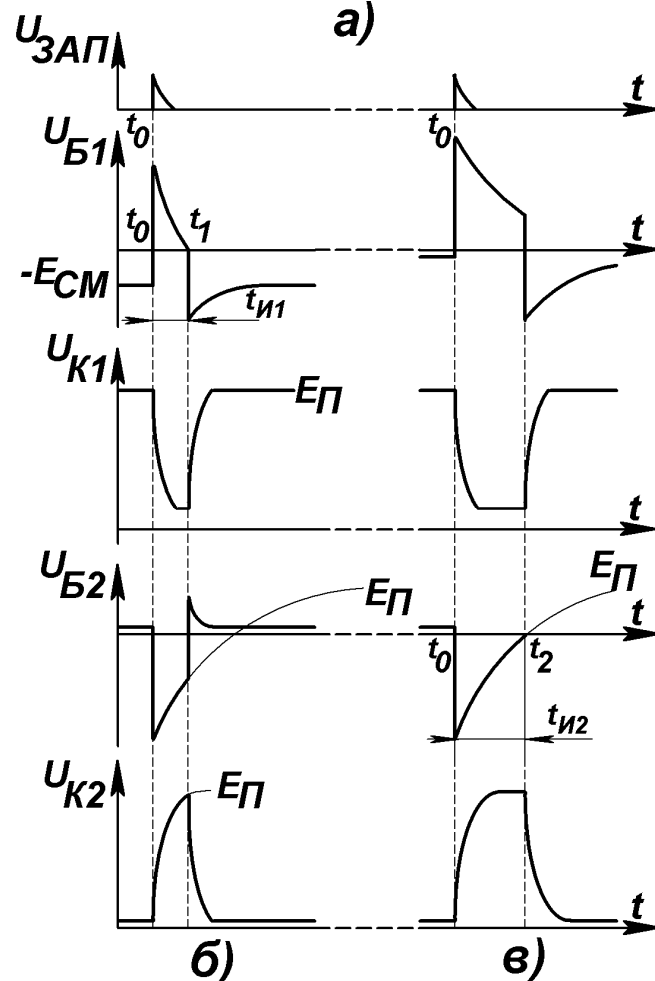
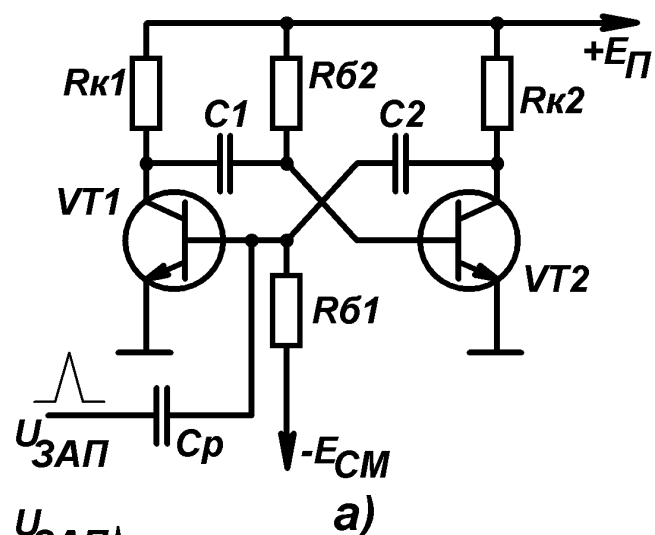


Рис.21. Принципиальная схема заторможенного симметричного мультивибратора (а); временные диаграммы его работы (б).

Путь 2. При переходе мультивибратора во временно устойчивое состояние одновременно с перезарядом конденсатора C_2 начинается и перезаряд конденсатора C_1 по цепи эмиттер-коллектор VT1 – $C_1 - R_{\text{б}2}$, в связи с чем потенциал базы VT2 от уровня $U_{\text{Б}2} \approx \Delta U_{\text{К}1}$ устремляется к $U_{\text{Б}2} \approx E_{\text{п}}$. Если перезаряд конденсатора C_2 происходит медленно Дей перезаряда конденсатора C_1 (скорости их перезарядов задаются параметрами схемы), то ещё при насыщенном транзисторе VT1 потенциал базы VT2 может оказаться положительным и вто-

рмально

рой транзистор начнет открываться. Появившийся на его коллекторе отрицательный скачок потенциала через конденсатор C_2 передается на базу VT1, способствуя его запираению. Этот процесс также приводит к возврату мультивибратора в исходное устойчивое состояние.

Очевидно, что длительность формируемого импульса в зависимости от величин постоянных времени перезаряда конденсаторов C_1 и C_2 будет определяться процессом, который первым выведет мультивибратор из временно устойчивого состояния.

Для пути 1

$$t_{И1} = C_2 R_K \ln \frac{E_{II} - 2U_D}{E_{CM} + U_D}, \quad (35,а)$$

где U_D – напряжение на открытом р-п-переходе транзистора
 $U_D \approx 0,2 \div 0,3$ В.

Для пути 2

$$t_{И2} = C_1 R_{B2} \ln \frac{E_{II} + E_{II}}{E_{II} - 0} \approx 0,7 R_{B2} C_1. \quad (35,б)$$

После окончания процесса формирования импульса и обратного опрокидывания мультивибратор возвращается в исходное состояние не сразу, а лишь через определенное время восстановления, за которое конденсаторы C_1 и C_2 должны успеть зарядиться до исходного напряжения. Если хотя бы один из процессов перезаряда не успеет закончиться до прихода очередного запускающего импульса, длительности формируемых импульсов могут оказаться нестабильными, зависящими от степени законченности процессов восстановления, длительности которых для рассмотренной схемы составляют

$$t_{ВОССТ 1} \approx 5C_2 R_{B1} \text{ и } t_{ВОССТ 2} \approx 5C_1 R_{K1}. \quad (36)$$

При расчете мультивибратора и выборе его элементов, очевидно, необходимо проводить проверку длительностей обоих процессов формирования импульсов и длительностей их стадий восстановления.

Из-за сложности рассмотренных процессов и их многопараметровости симметричные мультивибраторы в ждущем режиме используются редко, лишь когда этот режим является дополнительным к автоколебательному.

Для исключения многопараметровости в ждущем режиме чаще всего используют асимметричную схему мультивибратора с одной лишь храниющей емкостью. На рис.22 приведена схема заторможенного мультивибратора с коллекторно-базовыми связями, использованная в интегральной микросхеме 119ГФЗ. Заторможенный режим обеспечивается тем, что в ждущем состоянии второй транзистор насыщен базовым током через резистор R_{B2} , а первый транзистор заперт, так как его база соединена с коллектором второго транзистора через делитель напряжения $R_2 R_3$. Коллекторное напряжение второго транзистора, поступая на базу VT1 через делитель напряжения $R_2 R_3$, оказывается недостаточным для его отпираения. В результате первый транзистор

поддерживается закрытым.

Для запуска мультивибратора положительный входной импульс дифференцируется цепочкой C_1R_1 и положительный бросок, возникающий на фронте импульса, через диод VD_2 поступает на базу VT_1 , открывая его. Начинает протекать коллекторный ток, создающий падение напряжения на R_{K1} . Передний (отрицательный) фронт U_{K1} через диод VD_1 и конденсатор C_2 передается на базу второго транзистора, запирая его. На коллекторе второго транзистора потенциал повышается до $E_{П}$, в результате чего положительное напряжение, снимаемое с коллектора VT_2 через делитель R_2R_3 , поддерживает первый транзистор в насыщенном состоянии вплоть до окончания процесса формирования импульса. Конденсатор C_3 является ускоряющим, способствуя процессу отпирания первого транзистора.

Синхронно с началом формирования импульса по цепи эмиттер-коллектор VT_1 - VD_1 - C_2 - R_{B2} начинается перезаряд конденсатора C_2 , в результате чего потенциал базы VT_2 постепенно повышается, стремясь к $E_{П}$. Как только U_{B2} превысит нулевой уровень, VT_2 открывается, через

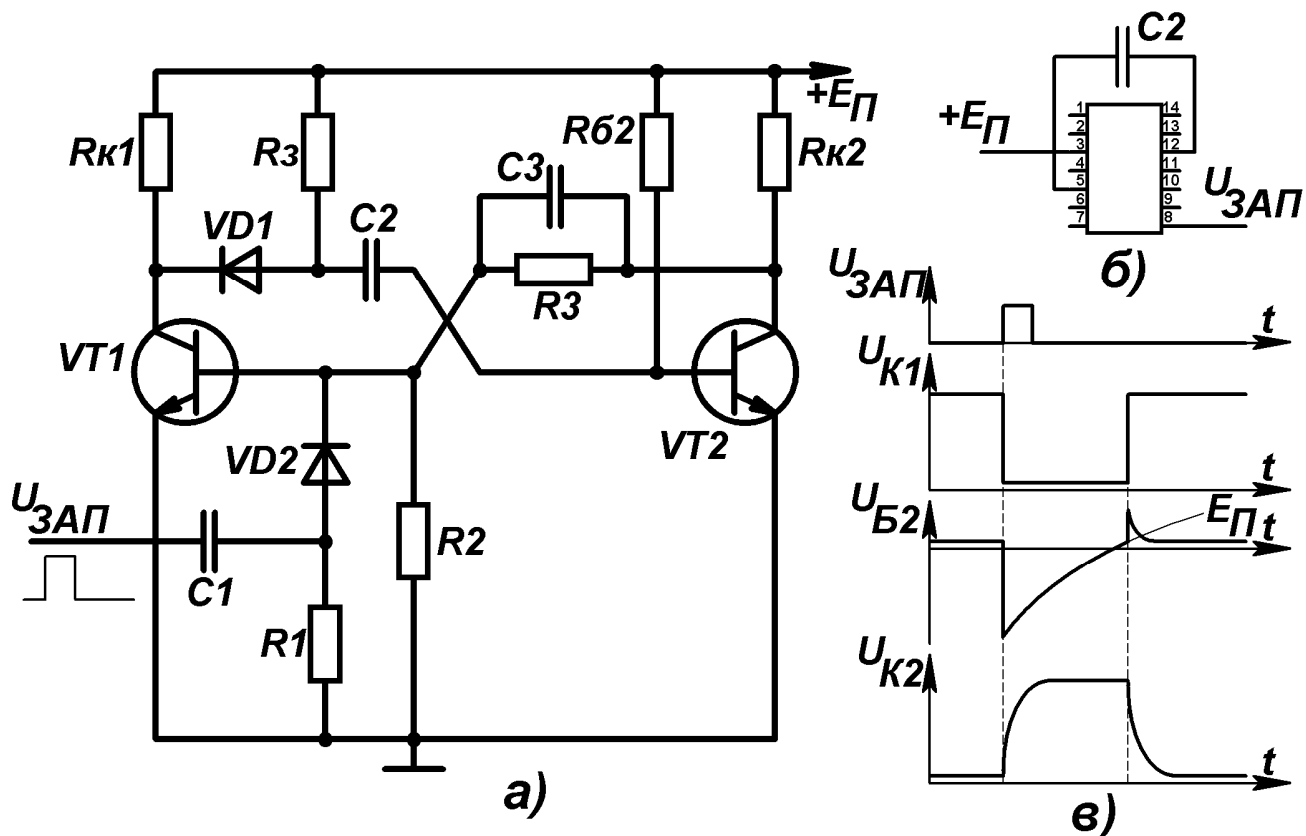


Рис.22. Заторможенный мультивибратор на ИМС 118ГФЗ: а) – принципиальная схема; б) – схема включения микросхемы; в) – временные диаграммы.

него начинает течь коллекторный ток и потенциал коллектора снижается. Это снижение через цепочку $R_2C_3R_3$ передается на базу первого транзистора и запирает его. Процесс формирования импульса, положительного на коллекторе VT_2 и отрицательного на коллекторе VT_1 при этом заканчивается. В стадии восстановления происходит заряд конденсатора C_2 через R_3 и эмиттер-базовый переход VT_2 до исходного напряжения, равного

$$U_{C2} \approx E_{\Pi} - U_{B2} \approx E_{\Pi}.$$

Расчет длительности импульса и стадии восстановления, а также выбор всех элементов аналогичны расчетам в рассмотренных выше схемах автоколебательных мультивибраторов. Перестройка длительности импульса производится подстройкой емкости конденсатора C_2 .

Как видно из рассмотренных схем, симметричные мультивибраторы больше приспособлены к работе в автоколебательном режиме. В ждущем режиме намного удобней использовать несимметричные мультивибраторы с эмиттерной связью, позволяющие производить однопараметровую регулировку при меньшей длительности стадии восстановления.

3.2. Мультивибратор с эмиттерной связью. Ждущий режим работы.

Базовая схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью и временные диаграммы его работы приведены на рис.23. Рассмотрим принцип его действия и основные расчётные соотношения.

Поскольку база второго транзистора через R_{B2} всегда подключена к шине питания, в режиме ожидания VT2 всегда открыт и, как правило, насыщен. В результате разности потенциалов между его электродами составляют всего 0,2-0,3 В, что позволяет считать транзистор VT2 эквивалентной точкой, потенциал которой задается делителем напряжения $R_{B2}R_{K2}R_{Э}$. Так как R_{B2} много больше R_{K2} и $R_{Э}$,

$$U'_{B2} \approx U'_{K2} \approx U'_{Э} \approx \frac{R_{Э}}{\frac{R_{B2} \cdot R_{K2}}{R_{B2} + R_{K2}} + R_{Э}} \approx \frac{R_{Э}}{R_{K2} + R_{Э}}.$$

В приведенном выражении и дальше одним штрихом обозначаются напряжения на элементах схемы в стадии ожидания.

Потенциал базы первого транзистора, задаваемый делителем напряжения R_1R_2 , устанавливается несколько ниже потенциала его эмиттера. В результате первый транзистор в режиме ожидания остается закрытым, его коллекторный ток практически равен нулю ($I_{K1} = I_{K0}$, где I_{K0} – тепловой ток закрытого транзистора), а потенциал его коллектора

$$U_{K1}' = E_{\Pi} - I_{K0}R_{K1} \approx E_{\Pi}.$$

Хронирующий конденсатор C_0 поддерживается заряженным на уровне

$$U_{C0}' = U_{K1}' - U_{Э}'.$$

При подаче положительного запускающего импульса $U_{ЗАП} > U_{Э}' - U_{CM1}$ первый транзистор приоткрывается и через него начинает протекать коллекторный ток, создающий падение напряжения на R_{K1} . Этот отрицательный скачок напряжения передается на базу второго транзистора и прикрывает его. В результате коллекторный ток I_{K2} уменьшается и если $R_{K1} > R_{K2}$, суммарный ток, протекающий через $R_{Э}$ также уменьшается. Уменьшается падение напряжения на $R_{Э}$ и снижаются потенциалы обоих

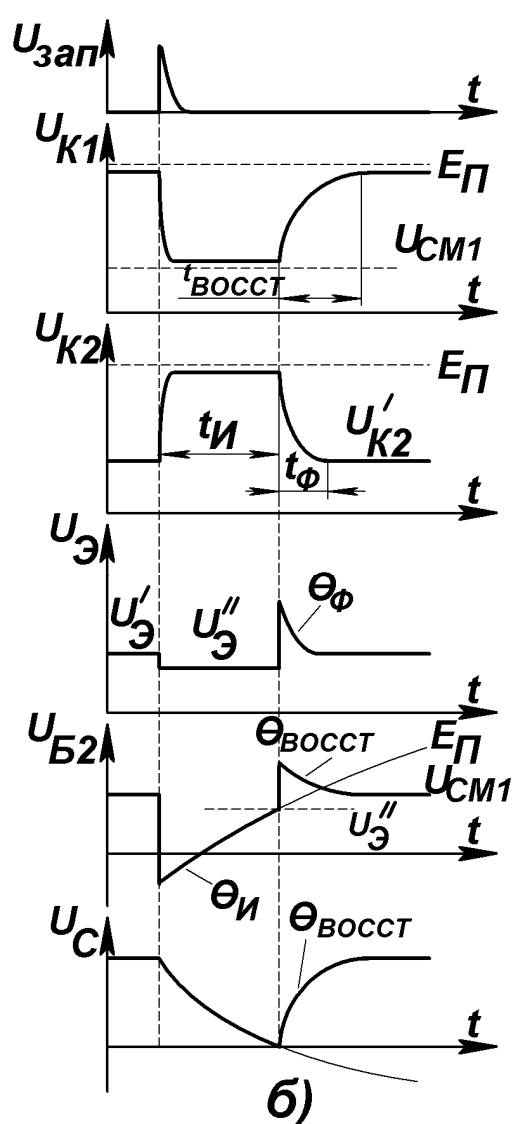
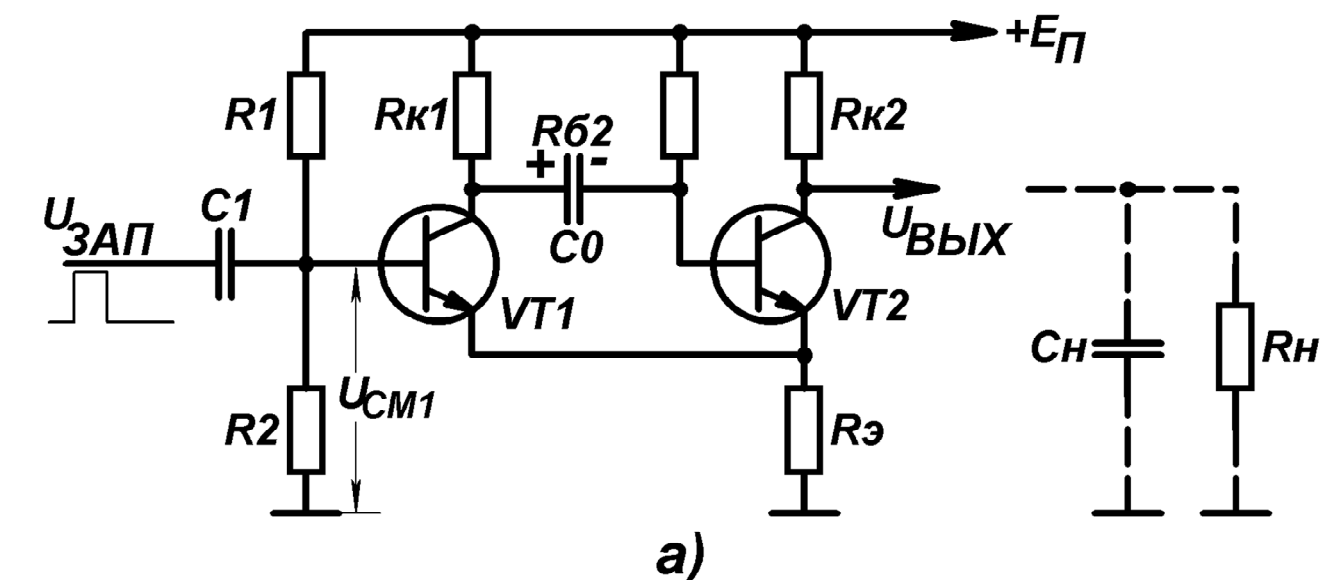


Рис.23. Принципиальная базовая схема (а) и временные диаграммы работы (б) ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.

эмиттеров. Снижение потенциала эмиттера VT1 так же, как и повышение потенциала его базы, приводит к увеличению разности потенциалов между его базой и эмиттером, увеличению базового тока и соответственно к дальнейшему понижению потенциала коллектора VT1. Таким образом приводится в действие цепь положительной обратной связи и мультивибратор лавинообразно переходит во временно устойчивое состояние, характеризуемое тем, что теперь первый транзистор переходит в насыщенное состояние с потенциалами на электродах, близкими к $U_{СМ1}$

$$U_{Э1}'' \approx U_{К1}'' \approx U_{Б1}'' \approx U_{СМ1},$$

где двумя штрихами обозначается напряжение на элементах схемы во время формирования импульса. Отрицательный скачок напряжения с коллектора VT1 через хранирующую емкость C_0 передается на базу второго транзистора и запирает его на всё время формирования импульса.

Поскольку база второго транзистора через $R_{Б2}$ подключена к шине питания, конденсатор C_0 начинает перезаряжаться и при этом потенциал базы VT2 устремляется к уровню $E_{П}$. Но как только он достигает уровня $U_{Э}''$, второй транзистор приоткрывается и через него также начинает протекать коллекторный ток, увеличивая общий ток через $R_{э}$ и падение напряжения на нем.

Потенциалы эмиттеров повышаются и в результате обратного лавинообразного процесса VT1 запирается, а VT2 опять переходит в состояние эквивалентной точки, т.е. в режим ожидания. Через некоторый интервал времени $t_{\text{ВОССТ}}$, необходимый для перезаряда храниющего конденсатора C_0 до исходного состояния, мультивибратор оказывается готовым к запуску очередным управляющим импульсом. На этом процесс формирования импульса завершается.

Рассмотрим количественные соотношения.

Поскольку $R_{K1} > R_{K2}$ и к тому же к коллекторной цепи первого транзистора подключен хранирующий конденсатор C_0 , выходной сигнал обычно снимают с коллектора второго транзистора, чтобы не нарушать работу храниющей цепи. В таком случае длительность фронта выходного импульса определяется выражением

$$t_{\phi 2}'' = 3\theta_{\phi 2} = 3R_{K2}C_{\Pi} = 3R_{K2}C_H, \quad (37)$$

где $C_{\Pi} = C_M + C_{\text{БК2}} + C_H$ – общая паразитная емкость в цепи коллектора второго транзистора;

C_M – емкость монтажа (обычно $10 \div 20$ пФ);

$C_{\text{БК2}}$ – емкость база-коллекторного перехода VT2 (единицы пФ);

C_H – емкость нагрузки.

Если длительность фронта лимитирована, то расчет следует начинать именно с определения максимально допустимого сопротивления резистора R_{K2} .

$$R_{K2} \leq \frac{t_{\phi 2}}{3C_H}. \quad (38)$$

При большом значении C_H или малом нагрузочном сопротивлении сигнал с коллектора VT2 следует снимать через эмиттерный повторитель, как в схемах симметричных мультивибраторов.

Длительность формируемого импульса определяется экспоненциальным процессом перезаряда храниющего конденсатора, то есть временем повышения потенциала базы второго транзистора от уровня

$$U_{B2}'' - \Delta U_{K1} \approx U_{B2}' - (E_{\Pi} - U_{\text{CM1}})$$

до уровня $U_{\text{Э}}'' \approx U_{\text{CM1}}$ и может быть определена по формуле, используемой в случае экспоненциального процесса

$$t_{\text{И}} = \theta_{\text{И}} \ln \frac{U_{B2}''(\infty) - U_{B2}''(0)}{U_{B2}''(\infty) - U_{B2}''(t_u)}, \quad (39)$$

где в рассматриваемой схеме

$$U_{B2}''(0) = U_{B2}' - \Delta U_{K1} \approx U_{B2}' - (E_{\Pi} - U_{\text{CM1}});$$

$$U_{B2}''(\infty) = E_{\Pi} - R_{B2}I_{K0} \approx E_{\Pi};$$

$$U_{B2}''(t_{\text{И}}) = U_{\text{Э}}'' \approx E_{\text{CM1}}.$$

Если во время формирования импульса транзистор VT1 можно

представить в виде эквипотенциальной точки, то эквивалентная схема цепи перезаряда выглядит как показано на рис.24.

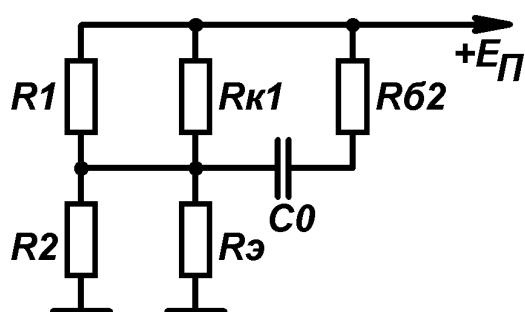


Рис.24.Эквивалентная схема перезаряда хранирующего конденсатора во время формирования импульса.

Поскольку $R_{б2} \gg R_1 || R_2 || R_{к1} || R_{э}$, с небольшой погрешностью постоянную времени, ответственную за длительность импульса, можно считать равной $\theta_u = C_0 R_{б2}$. Тогда

$$t_{II} = C_0 R_{б2} \ln \frac{2E_{II} - [U'_{б2} - (E_{II} - U_{см1})]}{E_{II} - U_{см1}} = C_0 R_{б2} \ln \frac{2E_{II} - U'_{б2} + U_{см1}}{E_{II} - U_{см1}} \quad (40)$$

Для приближенных инженерных расчетов пользуются выражением

$$t_{II} = 0,7 C_0 R_{б2}. \quad (41)$$

Из этого выражения определяется необходимая емкость конденсатора

$$C_0 \approx \frac{t_{II}}{R_{б2}}. \quad (42)$$

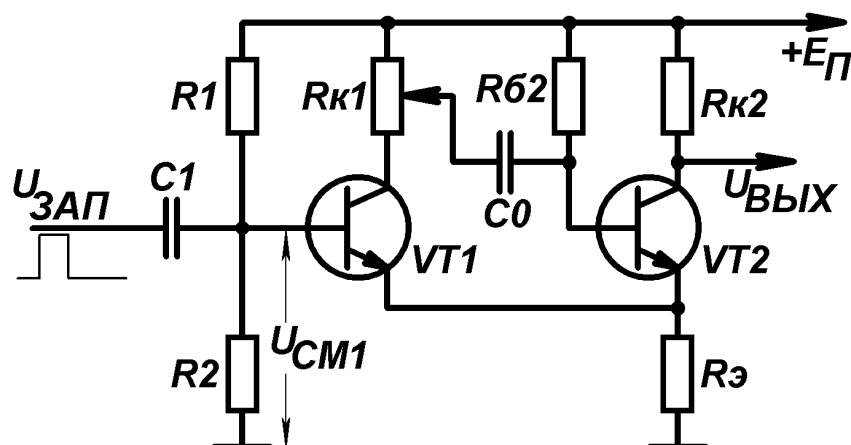


Рис.25. Принципиальная схема ждущего мультивибратора с плавной перестройкой длительности импульса.

ток первого транзистора $I_{к1}$ '' должен быть несколько меньше коллекторного тока второго транзистора $I_{к2}$ '. Выполнение этого требования обеспечивается выбором $R_{к1}$.

$$R_{к1} = (1,5 \div 4) R_{к2}. \quad (43)$$

Сопротивления резисторов R_1 и R_2 , задающих напряжение смещения

$U_{см1}$, выбираются так, чтобы ток делителя $I_{ДЕЛ} = \frac{E_{II}}{R_1 + R_2}$ был примерно

на порядок большим тока базы $I_{б1}$ '' , равного

При необходимости плавной регулировки длительности формируемого импульса может быть использован мультивибратор с регулировкой глубины положительной обратной связи (рис.25).

Для обеспечения положительного значения знака обратной связи коллекторный

$$I''_{Б1} = \frac{I''_{К1}}{B} = \frac{E_{П} - U_{СМ1}}{B},$$

где B – коэффициент усиления первого транзистора по току.

Сопrotивление резистора $R_{К2}$ и напряжение источника питания $E_{П}$ определяются из следующих соображений. Для расчета мультивибратора обычно задаются:

$R_{Н}$ – сопротивление нагрузки;

$C_{Н}$ – емкость нагрузки;

$U_{ВЫХ}$ – амплитуда импульса выходного сигнала;

$t_{И}$ – длительность импульса;

$t_{Ф}$ – максимально допустимая длительность фронта выходного сигнала;

$t_{ВОССТ}$ – максимально допустимая длительность стадии восстановления.

Если нагрузка высокоомна и её шунтирующим действием можно пренебречь, максимально допустимое сопротивление $R_{К}$ лимитируется лишь влиянием паразитной емкости и может быть определено из неравенства (36).

При малом сопротивлении нагрузки, подключенном непосредственно к коллектору VT2, сопротивление нагрузки вместе с резистором $R_{К2}$ образуют делитель напряжения, снижающий максимально возможную величину коллекторного напряжения до значения

$$U''_{К2} = E_{П} - \frac{R_{Н}}{R_{Н} + R_{К2}}.$$

Поэтому, стремясь к получению выходного импульса заданной амплитуды

$$U_{ВЫХ}'' = U_{К2}'' - U_{К2}' \quad (44)$$

следует или выбирать $R_{К2} \ll R_{Н}$, или, если есть запас по напряжению питания, увеличить напряжение питания до получения нужной амплитуды выходного импульса. Таким образом, максимально допустимое значение сопротивления $R_{К2}$ определяют «пристрелкой», выбирая меньшее значение из двух, полученных по формулам (36) и (44).

Напряжение питания должно с некоторым запасом обеспечивать сумму напряжений: $U_{РЭ} = U_{Э}''$, величину скачка напряжения $U_{ВЫХ}$ на коллекторе VT2 и падение напряжения на $R_{К2}$, создающееся при протекании через него тока нагрузки. То есть

$$E_{П} = (1,1 \div 1,2)(U_{Э}'' + U_{ВЫХ} + U_{R_{К}}''), \text{ где}$$

$$U''_{R_{К}} = \frac{E_{П} R_{К2}}{R_{К2} + R_{Н}}.$$

И окончательно выбираем

$$E_{П} \geq 1,2 \frac{U'_{Э} + U_{ВЫХ}}{1 - \frac{R_{К2}}{R_{К2} + R_{Н}}}. \quad (45)$$

Предварительно $E_{П}$ можно принять равным

$$E_{\Pi} = (1,2 \div 1,5)U_{\text{ВЫХ}}, \quad (46)$$

чтобы затем его уточнить.

Несколько слов о выборе сопротивления резистора $R_{\text{Э}}$. Так как через $R_{\text{Э}}$ во время формирования импульса замыкается цепь положительной обратной связи, которая чем глубже, тем круче фронты генерируемых импульсов, то его обычно выбирают не слишком малым, примерно на уровне $R_{\text{Э}} \approx (0,3 \div 0,5)R_{\text{К2}}$. В таком случае

$$U_{\text{Э}}' \approx U_{\text{Б2}}' \approx U_{\text{К2}}' \leq 0,3 E_{\Pi}.$$

Величина сопротивления $R_{\text{Б2}}$ выбирается так, чтобы в стадии ожидания обеспечивалось неглубокое насыщение транзистора VT2, то есть для базовой схемы

$$R_{\text{Б2}} \approx (0,8 \div 0,9)B_2R_{\text{К2}}. \quad (47)$$

Разделительный конденсатор C_1 служит для разделения цепей базы и источника запускающих импульсов по постоянному току. Его емкость должна быть лишь достаточной для пропускания фронта запускающего импульса, то есть должно выполняться условие

$$\theta_{\text{РЦ}} = C_1 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \geq 3t_{\text{Ф ЗАП. ИМП.}}, \text{ где}$$

$\theta_{\text{РЦ}}$ – постоянная времени разделительной цепи;

$t_{\text{Ф ЗАП. ИМП.}}$ – длительность фронта запускающего импульса.

В момент окончания формирования выходного импульса запирается транзистор VT1 и отпирается и доводится до насыщения VT2. Начинается перезаряд храниющего конденсатора C_0 до исходного напряжения. Перезаряд осуществляется по цепи $E_{\Pi} - R_{\text{К1}} - C_0 - R_{\text{Б2 экв}} -$ общий провод, где $R_{\text{Б2 экв}}$ – полное эквивалентное входное сопротивление второго транзистора со стороны базы. Поскольку в стадии ожидания и в том числе в стадии восстановления второй транзистор эквивалентен эквипотенциальной точке, то его эквивалентное входное сопротивление складывается из суммы трех сопротивлений

$$\frac{1}{R_{\text{Б2 экв}}} = \frac{1}{R_{\text{Б2}}} + \frac{1}{R_{\text{К2}}} + \frac{1}{R_{\text{Э2}}}.$$

Вследствие того, что $R_{\text{Б2}} \gg R_{\text{К2}}, R_{\text{Э}}$, им можно пренебречь.

Окончательно постоянную времени $\theta_{\text{ВОССТ}}$, отвечающую за время восстановления, можно принять равной

$$\theta_{\text{ВОССТ}} = C_0 \left(R_{\text{К1}} + \frac{R_{\text{К2}} R_{\text{Э}}}{R_{\text{К2}} + R_{\text{Э}}} \right),$$

а длительность самой стадии восстановления определить выражением

$$t_{\text{ВОССТ}} = 5C_0 \left(R_{\text{К1}} + \frac{R_{\text{К2}} R_{\text{Э}}}{R_{\text{К2}} + R_{\text{Э}}} \right).$$

Такую же длительность имеет и срез импульса на коллекторе пер-

вого транзистора.

После полного расчета мультивибратора следует проверить допустимость длительности стадии восстановления. Полная суммарная длительность формируемого импульса и пятикратной длительности стадии восстановления не должна превышать период повторения T запускающих импульсов

$$T \geq t_{\text{и}} + 5t_{\text{восст}}. \quad (48)$$

Если условие не выполняется, то следует использовать схему с эмиттерным повторителем, позволяющую на порядок сократить длительность стадии восстановления. В остальном расчет схемы аналогичен описанному.

Несколько слов о выборе транзисторов. Во-первых, транзисторы должны выдерживать максимально возможные в самых неудачных ситуациях разности потенциалов, возникающие между их электродами. Для первого транзистора самым высоким напряжением между его коллектором и другими электродами может быть напряжение питания $E_{\text{п}}$.

Со вторым транзистором дело обстоит хуже. В процессе отпирания первого транзистора потенциал его коллектора может снизиться от уровня $E_{\text{п}}$ до $0,2 E_{\text{п}}$, то есть на нем возникает отрицательный скачок напряжения, практически равный $E_{\text{п}}$. Этот скачок через хранирующий конденсатор C_0 передается на базу второго транзистора, которая была в стадии ожидания примерно под потенциалом $(0,2 \div 0,3)E_{\text{п}}$. В то же время потенциал коллектора запирающегося транзистора VT_2 повышается до $E_{\text{п}}$. В результате разность потенциалов между его коллектором и базой может увеличиться до $1,6 E_{\text{п}}$. Это обстоятельство требует в качестве транзистора VT_2 использовать транзистор с максимально допустимым напряжением $U_{\text{к}} = 2E_{\text{п}}$.

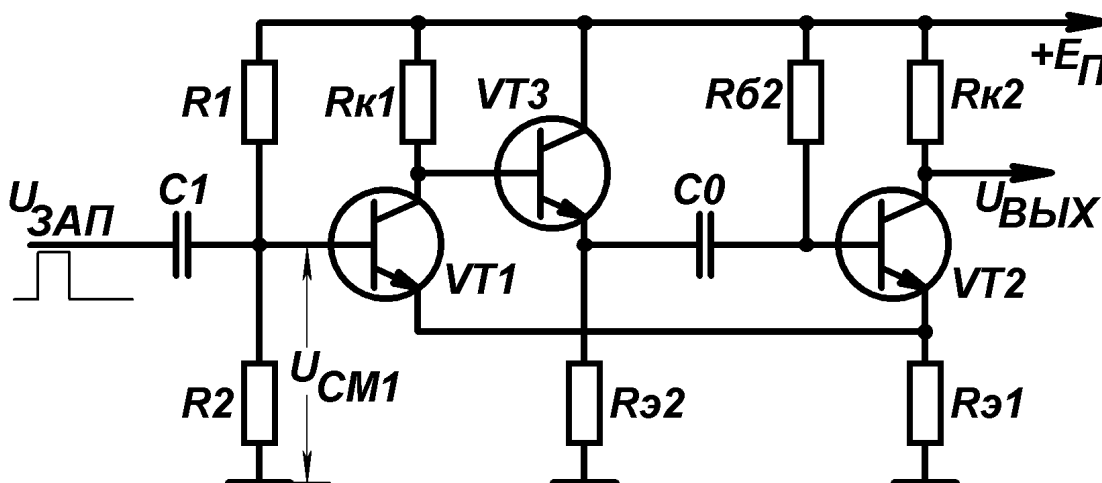


Рис.26. Одновибратор с эмиттерным повторителем в цепи перезаряда конденсатора C_0 .

К транзистору VT_2 также предъявляются повышенные требования и по величине коллекторного тока, особенно при низкоомной нагрузке. Во время формирования импульса через $R_{\text{к}2}$ и сопротивление нагрузки протекает ток

$$I_H'' = \frac{E_{II}}{R_{K2} + R_H}. \quad (48)$$

В стадии ожидания весь этот ток переключается в коллекторную цепь транзистора VT2. Следовательно транзистор должен быть способен в статическом режиме пропускать через себя коллекторный ток, практически равный I_H'' .

Из сказанного следует сделать вывод, что в ждущем мультивибраторе с эмиттерной связью при низкоомной нагрузке целесообразно использовать транзисторы различных типов. Транзистор VT1 может быть маломощным, но желательно с большим коэффициентом усиления для обеспечения условия баланса амплитуд, а VT2 – достаточно высоковольтным и повышенной мощности.

И во-вторых – о требуемых частотных свойствах транзисторов. Каждому ключу на биполярных транзисторах для его переключения требуется некоторый интервал времени для перезаряда емкостей переходов база-эмиттер и база-коллектор, а также для накопления и рассасывания в базе объемного заряда. Об этих процессах не всегда напоминают, но они всегда имеют место и всегда приводят к завалу верхней граничной частоты усиления транзистора и, в нашем случае, к уменьшению быстродействия всего устройств. Поэтому следует оценить целесообразность использования тех или иных типов транзисторов в рассматриваемом ждущем мультивибраторе.

Наиболее быстрыми процессами при формировании импульса являются процессы формирования его фронтов. Для получения достаточно прямоугольного импульса желательно, чтобы длительности его фронтов были на порядок меньше длительности самого импульса. Вспомним известное соотношение

$$t_{\phi 1} = \frac{0,35}{f_{ГВ}},$$

связывающее активную длительность фронта, вносимого цепью с ограниченным значением частотной характеристики ($f_{ГВ}$) с удлинением фронта импульса. Из этого соотношения можно сделать прикидочный вывод, что для получения импульса удовлетворительной формы следует использовать транзисторы с граничной частотой усиления f_{α} , обычно указываемой в справочниках, со значением не ниже

$$f_{\alpha} > \frac{10 \div 20}{t_{II}}. \quad (49)$$

3.3. Схемы запуска ждущего мультивибратора.

Спровоцировать ждущий мультивибратор на формирование очередного импульса можно несколькими путями, например, как показано на рис. 27:

- 1) подачей положительного запускающего импульса на базу первого

- транзистора, как было рассмотрено выше (точка 1);
- 2) подачей отрицательного запускающего импульса в цепь эмиттеров транзисторов, при этом снижается потенциал эмиттера первого транзистора и происходит его отпирание с последующим циклом формирования (точка 2);
 - 3) подачей отрицательного импульса на базу VT3, при этом импульс пройдёт через повторитель на VT3 и попадёт на базу VT2, приоткрывая его (точка 3);
 - 4) подачей отрицательного импульса в цепь базы второго транзистора, вызывая запираание VT2 и тем самым отпирание VT1; при таком способе в цепь храниющего конденсатора целесообразно включить небольшой резистор R_4 (100 ÷ 200 Ом) для уменьшения степени шунтирования генератора запускающих импульсов низкоомным выходом эмиттерного повторителя на VT3 (точка 4);
 - 5) подачей отрицательного импульса на коллектор первого транзистора через разделительный диод VD1 (точка 5).

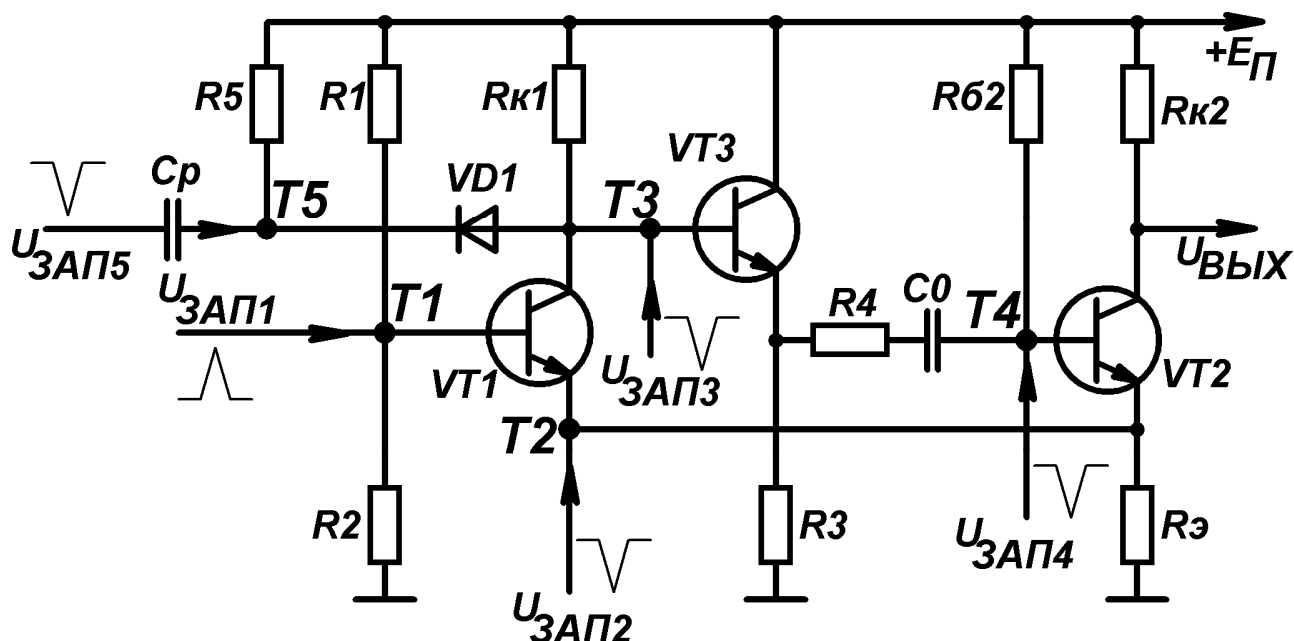


Рис.27. Способы запуска ждущего мультивибратора.

Первые четыре способа не являются оптимальными, так как в цепях запуска могут присутствовать сигналы помех, которые могут вызвать преждевременное начало формирования импульса или преждевременное отпирание транзистора VT2, что приведёт к уменьшению длительности формируемого импульса.

Наилучшим следует считать способ подачи отрицательного запускающего импульса в цепь коллектора VT1 через разделительный диод VD1. В режиме ожидания диод находится в нейтральном состоянии, так как и на его катоде и на аноде через R_5 и R_{K1} устанавливаются потенциалы, равные $E_{п}$. При подаче отрицательного запускающего импульса диод VD1 отпирается и свободно пропускает импульс на

коллектор VT1 и дальше к базе VT2, запирая его и приводя к началу формирования выходного импульса. Транзистор VT1 отпирается, потенциал его коллектора сильно понижается (почти до E_{CM1}) и диод надежно запирается до окончания стадии формирования импульса, препятствуя преждевременному прохождению помех в схему мультивибратора. Как только после формирования импульса закончится стадия восстановления, диод возвращается в нейтральное состояние и схема будет готова к приему очередного импульса запуска. Этот метод отсечения цепи запуска от управляемого ждущего генератора на время формирования импульса как наиболее надежный следует использовать всегда, когда это возможно.

3.4. Контрольные вопросы по ждущему мультивибратору.

1. Чем отличается ждущий режим работы мультивибратора от автоколебательного?
2. Как перевести симметричный мультивибратор из автоколебательного режима в ждущий?
3. Какие процессы протекают в ждущем мультивибраторе во время стадии восстановления?
4. В чем заключается неудобство использования симметричного мультивибратора в ждущем режиме?
5. Чем предпочтительней мультивибратор с эмиттерной связью для работы в ждущем режиме?
6. Как можно произвести запуск ждущего мультивибратора с эмиттерной связью?
7. Какая схема запуска ждущего мультивибратора предпочтительней? Почему?
8. Как можно изменить длительность импульса, формируемого ждущим мультивибратором?
9. Как можно мультивибратор с эмиттерной связью из ждущего режима работы перевести в автоколебательный?
10. Как можно сократить длительность стадии восстановления в ждущем мультивибраторе с эмиттерной связью?
11. Как подключение низкоомной нагрузки может повлиять на параметры выходного импульса? Почему?
12. Как предпочтительней подключить низкоомную нагрузку к схеме мультивибратора с эмиттерной связью?
13. Какие требования следует учитывать при выборе транзисторов для мультивибратора с эмиттерной связью?
14. Как изменение напряжения $E_{оп}$ может повлиять на характер работы мультивибратора с эмиттерной связью?

3.5. Пример расчета ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.

При расчете ждущего мультивибратора с эмиттерной связью (рис.23) исходными данными в большинстве случаев являются:

- амплитуда формируемых импульсов $U_{ИМП}$;
- длительность формируемых импульсов $t_{И}$;
- максимально допустимая длительность фронта формируемого импульса t_{Φ} ;
- период повторения $T_{ЗАП}$ или частота повторения F запускающих импульсов;
- сопротивление нагрузки $R_{Н}$;
- емкость нагрузки $C_{Н}$.

Пусть необходимо рассчитать ждущий мультивибратор, формирующий импульсы с параметрами: $U_{ВЫХ} = 8 \text{ В}$ и $t_{И} = 100 \text{ мкс}$ при $T_{ЗАП} = 1 \text{ мс}$ и $C_{Н} = 200 \text{ пФ}$.

1. Из соотношения (46) предварительно определяем $E_{П}$.

$$E_{П} \geq 1,3 U_{ИМП} = 10,4 \text{ В.}$$

Воспользуемся имеющимся в устройстве стабилизированным источником питающего напряжения $E_{П} = 12,6 \text{ В}$. При этом коэффициент использования питающего напряжения ξ составит

$$\xi > \frac{U_{ИМП}}{E_{П}} = \frac{8 \text{ В}}{12,6 \text{ В}} = 0,63.$$

2. Определяем необходимые частотные свойства транзисторов.

$$f_{\alpha} > \frac{10 \div 20}{t_{И}} = \frac{20}{100 \cdot 10^{-6}} = 20 \cdot 10^4 = 200 \text{ кГц}.$$

3. В соответствии с временной диаграммой напряжений на электродах транзисторов (рис.23,б) определяем необходимые минимально допустимые напряжения коллекторного и эмиттерного переходов транзисторов.

Для транзистора VT1 $U_{КЭ1} > E_{П}$, $U_{КБ1} > E_{П} = 12,6 \text{ В}$.

Для транзистора VT2 $U_{КЭ2} > E_{П}$, $U_{КБ2} > 2E_{П} = 25,2 \text{ В}$.

4. По заданной максимально допустимой длительности фронта выходного импульса определяем сопротивление коллекторного резистора $R_{К2}$. Так как емкость нагрузки $C_{Н}$ подключена непосредственно к коллектору VT2 и при запирации VT2 она заряжается именно через $R_{К2}$, длительность фронта определяется постоянной времени $\theta_{\Phi} = R_{К2}C_{П}$, где $C_{П} = C_{Н} + C_{БК2} + C_{М}$. Так как $C_{М} + C_{БК2} \ll C_{Н}$, ими пренебрегаем и тогда $t_{\Phi} = 3R_{К2}C_{Н}$.

$$\text{Отсюда } R_{К2} \leq \frac{t_{\Phi}}{3C_{Н}} = \frac{10^{-6}}{3 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} = 26 \text{ кОм}.$$

5. Максимальный коллекторный ток через второй транзистор в данной схеме

$$I_{K2} \leq \frac{E_{\Pi}}{R_{K2}} = \frac{12,6}{16 \cdot 10^{-3}} < 1 \text{ мА}.$$

Такой ток выдержит любой транзистор. Поэтому, учитывая лишь предельно допустимые напряжения между электродами транзистора, определенные в п.2, выбираем транзисторы широкого применения типа КТ315В. Для этого транзистора $I_{K \text{ МАКС}} = 100 \text{ мА}$; $V = 20 \div 90$; $I_{K0 \text{ МАКС}} = 1 \text{ мкА}$; $f_{\alpha} = 100 \text{ МГц}$.

Коллекторный ток целесообразно выбирать побольше, но не более $0,5I_{K \text{ МАКС}}$ (дальше будет понятно, почему).

Выбрав величину коллекторного тока $I_{K2} = 2 \text{ мА}$, находим

$$R_{K2} = \frac{U_{\text{ИМП}}}{I_{K2}} = \frac{8}{2 \cdot 10^{-3}} = 4 \text{ кОм}.$$

6. Определяем R_{B2} . В стадии ожидания транзистор VT2 должен быть слегка насыщен. Поэтому, если в качестве источнике смещения для второго транзистора используется тот же источник E_{Π} , сопротивление резистора R_{B2} определяем из соотношения

$$R_{B2} < V_2 R_{K2} = 20 \cdot 4 = 80 \text{ кОм}.$$

Вспомним раздел 2.7.2 настоящего пособия о работе транзисторов при повышенной температуре, а именно, о влиянии величины тока I_{K0} на стабильность работы мультивибраторов. Для обеспечения стабильности длительности формируемого импульса обычно выбирают сопротивление резистора в хронизирующей цепи (в нашем случае R_{B2}) таким, чтобы выполнялось условие $R_{B2} I_{K0} \ll E_{\text{см}}$. То есть для нашего случая должно выполняться условие $R_{B2} I_{K0} = 80 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,08 \text{ В}$, что намного меньше $E_{\Pi} = 12,6 \text{ В}$.

Условие, как будто, выполняется. Но мы взяли из справочника минимальное значение тока I_{K0} , которое соответствует комнатной температуре. Если же температура будет повышаться, соответственно будет увеличиваться и ток I_{K0} , создавая при протекании через R_{K2} дополнительное падение напряжения на нём.

Кроме того, как видно из справочника, транзисторы серии КТ315 (КТ315А - И) могут иметь значения токов I_{K0} до 10 и даже 100 мкА. При существующем разбросе параметров не следует сомневаться, что нам достанутся транзисторы с током I_{K0} до 10 мкА, а при повышенной температуре этот ток может возрасти и до 20 мкА. То есть может случиться, что произведение $R_{B2} I_{K0}$ достигнет значения $80 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 1,6 \text{ В}$, что не на много меньше E_{Π} .

Специально отбирать транзисторы с малым I_{K0} – неблагоприятная работа. Гораздо проще, например в 3 раза, уменьшить сопротивление резистора R_{B2} , выбрав его в соответствии с таблицей типономиналов (см. справочник по резисторам или радиолобителя) равным 22 кОм.

В результате максимальное падение напряжения на резисторе R_{B2} из-за тока I_{K0} снижается до 0,44 В, что уже вполне допустимо.

$$R_{B2} I_{K0} = 22 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 0,44 \text{ В},$$

что намного меньше 12,6 В.

Соответственно, чтобы не ввести второй транзистор в перенасыщенный режим, необходимо также в 3 раза уменьшить величину сопротивления R_{K2} , выбрав его равным

$$R_{K2} = \frac{4 \cdot 10^3}{3} = 1,33 \text{ кОм}.$$

В соответствии с таблицей номиналов R_{K2} принимаем равным 1,3 кОм.

7. Рассчитаем $R_{Э}$. К сопротивлению $R_{Э}$, создающему скачок напряжения $\Delta U_{Э}$ при переключении транзисторов, предъявляются противоречивые требования. С точки зрения увеличения коэффициента использования питающего напряжения ξ сопротивление $R_{Э}$ должно быть по возможности меньшим. Но для создания достаточно большого перепада напряжения $\Delta U_{Э}$ для обеспечения надежной работы положительной обратной связи оно должно быть большим.

Для управления первым транзистором перепад напряжения, обеспеченный различием эмиттерных токов первого и второго транзисторов, должен быть не менее $1,5 \div 2$ В. Для этого эмиттерный ток второго транзистора должен быть в $2 \div 6$ раз больше тока $I_{Э1}$. Поэтому обычно параметры мультивибратора с эмиттерной связью выбирают так, чтобы ток второго транзистора был большим (но не более половины предельно допустимого тока коллектора), а первого - в несколько раз меньшим. Такой "форсированный" режим второго транзистора выгоден еще и тем, что обеспечивает высокую мощность импульсов, снимаемых с коллектора VT2.

В соответствии с коэффициентом использования питающего напряжения $\xi > \frac{U_{ИМП}}{E_{П}} = \frac{8В}{12,6В} = 0,63$ и исправленным значением R_{K2} находим величину тока второго транзистора.

$$I_{K2} = \frac{U_{ИМП}}{R_{K2}} = \frac{8}{1,3 \cdot 10^{-3}} = 6,3 \text{ мА}.$$

Поскольку в стадии формирования импульса второй транзистор эквивалентен эквипотенциальной точке, в первом приближении можно

считать $I_{Э} = I_{K2}$. $I_{Э} = I_{K2} = \frac{E_{П}}{(R_{K2} + R_{Э})}$. Отсюда

$$\begin{aligned} R_{Э} &= \frac{E_{П} - I_{K2}R_{K2}}{I_{K2}} = \frac{E_{П} - U_{ИМП}}{I_{K2}} = \frac{E_{П}}{I_{K2}} - R_{K2} = \frac{12,6}{6,3 \cdot 10^{-3}} - 1,3 \cdot 10^3 = \\ &= 2,2 \cdot 10^3 - 1,3 \cdot 10^3 = 900 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Это верхнее предельное значение сопротивления $R_{Э}$. При этом в стадии ожидания напряжение на эмиттерах обоих транзисторов будет равно

$$U_{Э2} = I_{K2}R_{Э} = 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot 900 = 5,6 \text{ В}.$$

Перепад напряжения $\Delta U_{\text{Э}}$ должен быть не менее $1,5 \div 2,5$ В. То есть во время формирования импульса напряжение на эмиттерах должно снизиться до $U_{\text{Э1}} = U_{\text{Э1}} - 2,5 \text{ В} = 5,6 \text{ В} - 2,5 \text{ В} = 3,1 \text{ В}$ или даже меньше того. Отсюда может быть найден максимально допустимый ток первого транзистора.

$$I_{\text{К1}} < \frac{U_{\text{Э1}}}{R_{\text{Э}}} = \frac{3,1}{900} = 3,44 \text{ мА}.$$

8. Выберем величину $R_{\text{К1}}$. Как уже обсуждалось, для обеспечения достаточно глубокой положительной обратной связи необходимо, чтобы ток коллектора первого транзистора был хотя бы в 1,5 раза меньше тока $I_{\text{К2}}$. Это обеспечит достаточный скачок напряжения на эмиттерах транзисторов при их переключении. Обычно выбирают $R_{\text{К1}} = (1,5 \div 4)R_{\text{К2}}$.

Если $R_{\text{К1}}$ выбирается ближе к верхней границе, в качестве транзистора VT1 может быть использован транзистор, менее мощный, чем VT2, но с целью унификации деталей желательно использовать однотипные транзисторы. Итак, имеем $R_{\text{К1}} = 2R_{\text{К2}} = 2,7 \text{ кОм}$. При этом во время формирования импульса напряжение на коллекторе VT1 составит

$$U_{\text{К1}} = E_{\text{П}} - I_{\text{К1}}R_{\text{К1}} = 12,6 - 3,44 \cdot 10^{-3} \cdot 2,7 \cdot 10^3 = 12,6 - 9,3 = 3,3 \text{ В}.$$

Поскольку в стадии формирования импульса VT1 должен быть слегка насыщен и благодаря этому также эквивалентен эквипотенциальной точке, очевидно, что напряжение на его базе, то есть $U_{\text{СМ1}}$, также должно быть равно 3,3 В.

9. Определим сопротивления резисторов R_1 и R_2 . Этот делитель во время формирования импульса, то есть когда VT1 открыт, должен обеспечить напряжение на базе VT1 $U_{\text{Б1}} = U_{\text{СМ1}} = 3,3 \text{ В}$. При этом для обеспечения $I_{\text{К1}} = 3,44 \text{ мА}$ при коэффициенте усиления первого транзистора $\beta_1 = 20$ базовый ток VT1 должен быть не менее

$$I_{\text{Б1}} \geq \frac{I_{\text{К1}}}{\beta_1} = \frac{3,44 \cdot 10^{-3}}{20} = 172 \text{ мкА}.$$

Полный ток делителя R_1R_2 принимаем на порядок больше тока $I_{\text{Б1}}$, т.е. равным 1,72 мА. Такой ток практически обеспечит постоянство напряжения смещения $U_{\text{Б1}}$ при отпирании и запираии VT1. Рассчитаем сопротивления R_1 и R_2 .

$$I_{\text{дел}} = \frac{E_{\text{П}}}{R_1 + R_2}.$$

Отсюда

$$R_1 + R_2 = \frac{E_{\text{П}}}{I_{\text{ДЕЛ}}} = \frac{12,6}{1,72 \cdot 10^{-3}} = 7,35 \text{ кОм}$$

$$U_{\text{СМ1}} = E_{\text{П}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = R_2 I_{\text{ДЕЛ}}.$$

$$\text{Отсюда } R_2 = \frac{U_{CM1}}{I_{ДЕЛ}} = \frac{3,3}{1,72 \cdot 10^{-2}} = 1,92 \text{ кОм и}$$

$$R_1 = (R_1 + R_2) - R_2 = 7,35 - 1,92 = 5,43 \text{ кОм.}$$

В качестве диода VD1 выбираем любой импульсный диод с максимально допустимым обратным напряжением не менее 20 В, например Д220.

Емкость разделительного конденсатора C_p , чтобы существенно не уменьшить амплитуду запускающего импульса, должна быть по крайней мере в несколько раз большей суммы паразитных емкостей в цепи базы VT1, в том числе емкости монтажа, входной и коллекторной емкостей VT1. В конечном итоге емкость C_1 должна быть не менее нескольких десятков пикофард.

Хронирующую емкость C_0 , определяющую длительность формируемого импульса, определяем из соотношения (3.8).

$$C_0 = 1,4 \frac{t_H}{R_{Б2}} = 1,4 \frac{100 \cdot 10^{-6}}{22 \cdot 10^3} = 4,54 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 4,5 \text{ нФ}.$$

4. Описание лабораторного макета.

Макет, по сути дела, представляет собой радиотехнический конструктор, позволяющий без применения пайки, только путём штеккерной коммутации собрать большое количество схем на тему «Мультивибраторы», задать различные режимы работы этих мультивибраторов, просмотреть на экране осциллографа временные диаграммы напряжений на элементах этих схем.

Если теоретические разделы пособия представляют собой микроэнциклопедию широко используемых радиотехнических решений, на примере мультивибраторов раскрывающих целесообразность их применения, то макет предоставляет возможность в реальном исполнении изучить их суть.

Желаю тебе, СТУДЕНТ, интересной деловой игры!

Макет выполнен на несущей гетинаксовой панели размером 300x500 мм, на которой установлены коммутационные гнёзда с припаянными к ним деталями, номинальные значения которых указаны на принципиальной схеме макета, находящейся на той же несущей панели под покровной панелью из оргстекла.

Номиналы деталей выбраны в соответствии с их широко применяемыми значениями и обеспечивают работоспособность схем в широком интервале значений питающих напряжений и нагрузок. Источник питания $E_{п}$ следует подключать только к соответствующим гнёздам, находящимся в правом верхнем углу панели.

Примечание. Подключение источников напряжения непосредственно к радиокомпонентам схемы запрещено, так как это может привести к выходу их из строя. Имеющиеся в макете, но не указанные на схеме элементы защиты работают только при подключении источников питания к соответствующим, специально указанным, гнёздам (в правом верхнем углу макета).

Электрическая схема макета показана на рис.28

Основу макета составляет базовая схема симметричного мультивибратора, собранного на транзисторах VT1 и VT2 (рис.29).

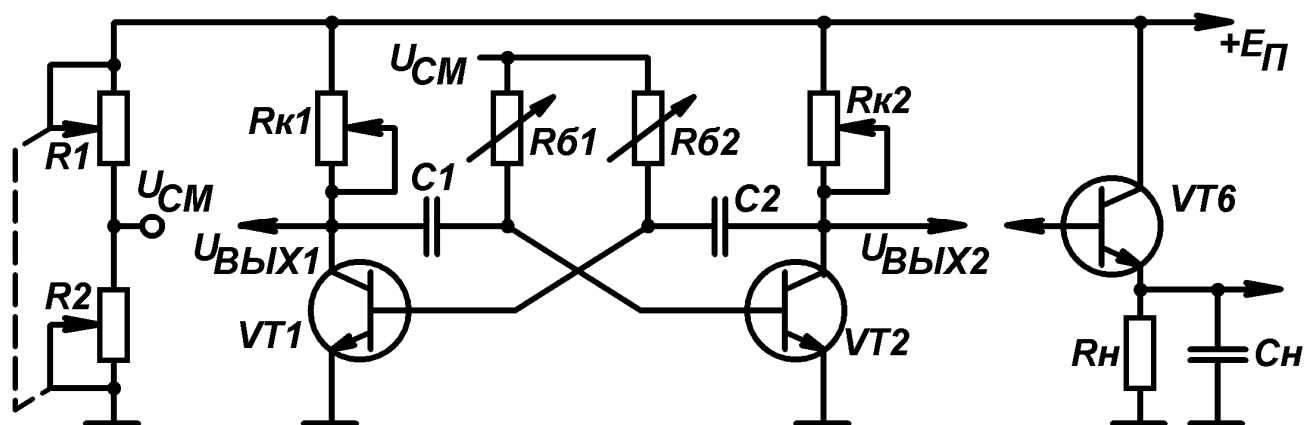


Рис.29. Базовая схема симметричного мультивибратора на биполярных транзисторах.

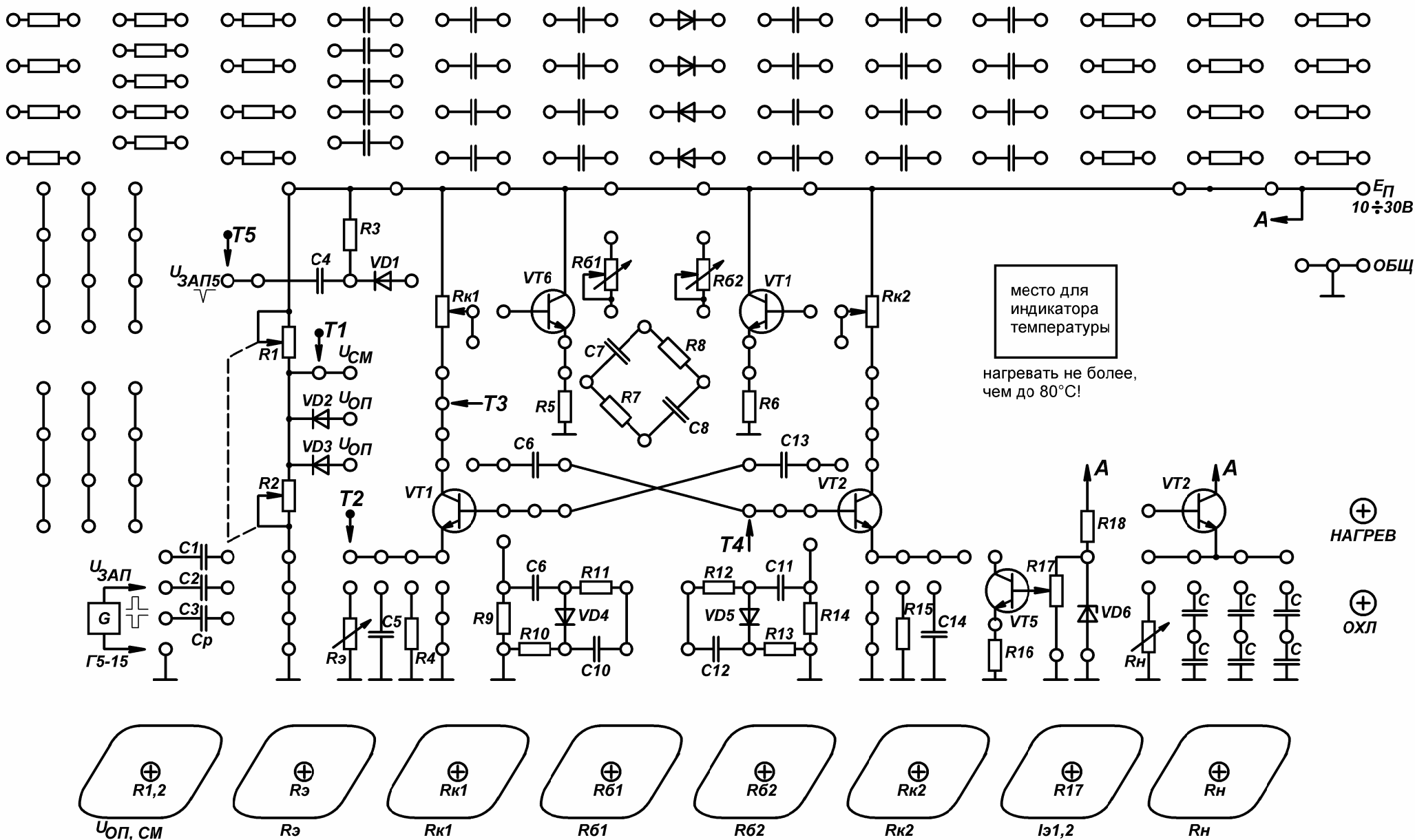


Рис. 28. Электрическая схема макета «Мультивибраторы на биполярных транзисторах»

В верхней полосе макета установлен магазин сопротивлений, конденсаторов и диодов, которые штекерами можно подключать к схемам исследуемых мультивибраторов в разрыв соответствующих проводников или параллельно тем или иным элементам схемы. Это позволяет устанавливать величины сопротивлений и ёмкостей схемы возможно ближе к расчётным значениям.

В нижней полосе макета установлен ряд переменных резисторов, указанных на схеме и позволяющих плавно изменять величины сопротивлений и соответственно токов в цепях исследуемых мультивибраторов.

Для исследования работы базовой схемы необходимо штекерными переключателями соединить ползунки резисторов $R_{K1,2}$ с коллекторами соответствующих транзисторов. Хранирующие конденсаторы C_6 и C_{13} соединить с коллекторами этих же транзисторов. Базы транзисторов VT1,2 через переменные резисторы $R_{B1,2}$ следует подключить к шине питания или к гнездам источника напряжения смещения U_{CM} , в качестве которого используется регулируемый делитель напряжения R_1R_2 . Мультивибратор готов к работе и при правильно установленном режиме (U_{CM} , $R_{K1,2}$, $R_{B1,2}$) должен начать генерировать П-импульсы напряжения, снимаемые с коллекторов транзисторов VT1 и VT2.

Измерение напряжений в различных точках схемы осуществляется посредством импульсного осциллографа, работающего в режиме внутренней синхронизации, в котором запуск генератора развёртки осциллографа осуществляется от исследуемого сигнала (от входной цепи осциллографа). Чувствительность канала вертикального отклонения устанавливается в соответствии с амплитудой исследуемого сигнала, а скорость развёртки – в соответствии с длительностью периода повторения исследуемых импульсов.

Макет снабжен рядом вспомогательных устройств, назначение и способы использования которых будут обсуждены ниже.

Для исследования влияния сопротивления нагрузки на работу схем в правой стороне макета установлен переменный резистор R_H , который может быть подключен или непосредственно к коллектору одного из транзисторов VT1 и VT2, или через эмиттерный повторитель на транзисторе VT6. Там же находятся и конденсаторы C15-C18, которыми можно моделировать ёмкости нагрузки. Их также можно подключать или непосредственно к коллекторам транзисторов, или, вместе с R_H , через эмиттерный повторитель на VT6.

На макете предусмотрена возможность исследования влияния температуры на работу (частоту и форму импульсов) мультивибратора. Для этого транзисторы VT1 и VT2 установлены на общем радиаторе с нагревателем, датчиком температуры и вентилятором. При нажатии кнопки «НАГРЕВ» включаются нагреватель и КРАСНЫЙ индикатор нагрева, питающиеся от того же источника $E_{П}$. О температуре транзисторов можно судить по показаниям индикатора температуры, находящегося на лицевой панели макета.

Внимание! Нагрев транзисторов выше 80°C недопустим, так как

может вызвать их выход из строя.

При нажатии кнопки «ОХЛ» включается вентилятор и транзисторы охлаждаются. Таким образом можно проследить влияние температуры на стабильность работы различных схем мультивибраторов.

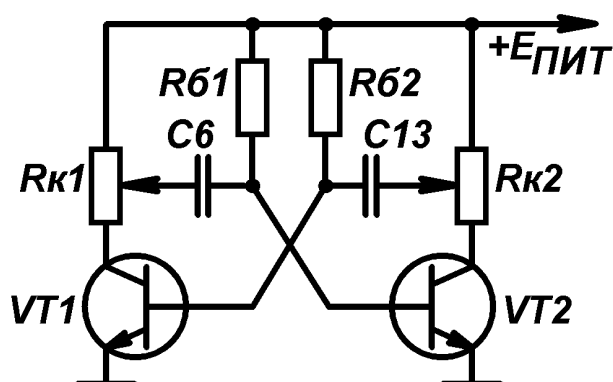


Рис.30. Схема симметричного мультивибратора с плавной регулировкой длительности импульсов

Подключив конденсаторы C_6 и C_{13} к ползункам потенциометров $R_{к1}$, $R_{к2}$ (рис.30) можно изучить возможность плавной перестройки длительностей импульсов путём изменения величин отрицательных скачков напряжения, передаваемых на базы.

При работе со схемами рис.29, 30 экспериментатор наверняка обратит внимание на большие длительности фронтов импульсов, вызванных процессом заряда хранирующих конденсаторов через коллекторные резисторы. Макет предоставляет возможность исследовать три метода уменьшения длительностей фронтов:

– путём заряда хранирующих конденсаторов через эмиттерные повторители (рис.31);

– путём применения шунтирующих диодов (рис.32);

– путём отделения цепей заряда храниющих конденсаторов от коллекторов транзисторов (рис.33).

Эмиттерные повторители реализуются на транзисторах VT_3 и VT_4 , для чего их базы соответственно должны быть соединены с коллекторными цепями транзисторов VT_1 и VT_2 , а храниющие конденсаторы – присоединены к эмиттерам VT_3 и VT_4 .

Для изучения работы шунтирующих диодов собирают базовую схему рис.29 и к коллекторам транзисторов VT_1 и VT_2 соответственно, как показано на рис.32, подключают аноды диодов $VD_{2,3}$.

Для изучения работы шунтирующих диодов собирают базовую схему рис.29 и к коллекторам транзисторов VT_1 и VT_2 соответственно, как показано на рис.32, подключают аноды диодов $VD_{2,3}$.

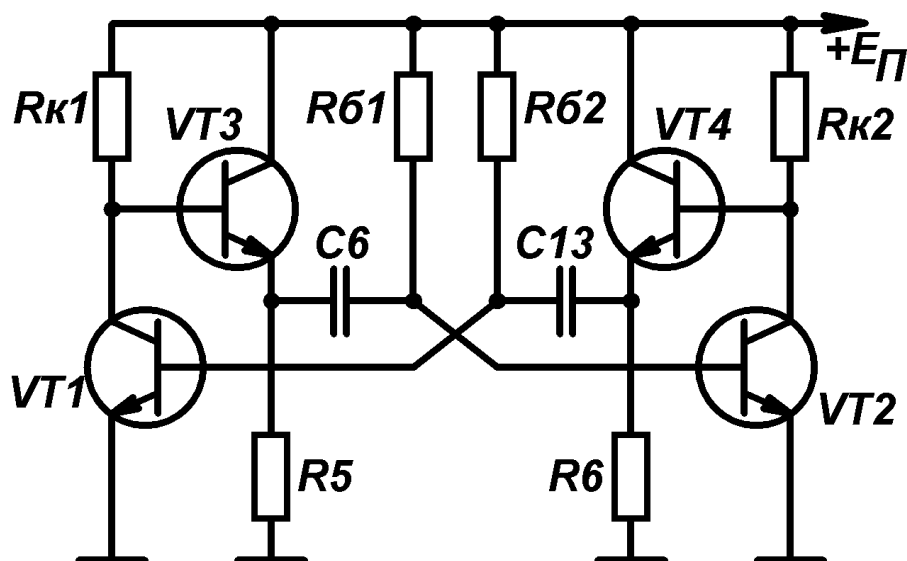


Рис.31. Схема симметричного мультивибратора с зарядом храниющих конденсаторов через эмиттерные повторители.

Катоды диодов уже подключены к тому же делителю напряжения R_1R_2 , изменяя коэффициент передачи которого можно изменять величину части питающего напряжения, подаваемой на диоды, и тем самым изменять величину опорного напряжения на диодах.

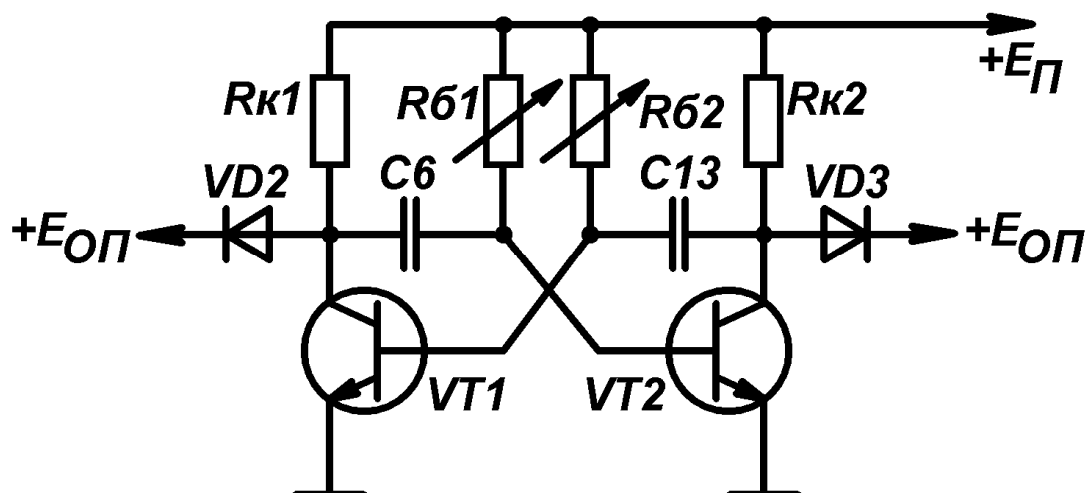


Рис.32. Схема симметричного мультивибратора с шунтирующими диодами в коллекторных цепях транзисторов.

Для ознакомления с методом отделения цепей заряда хранирующих конденсаторов собирают ту же базовую схему рис.29, но хранирующие конденсаторы подключают к соответствующим коллекторам через диоды VD7 и VD8, имеющиеся в магазине элементов в верхней части макета. Кроме того, по методике, рассмотренной в разделе 2.4.3 настоящего пособия, рассчитывают и устанавливают новые значения резисторов $R'_{к1,2}$, а в качестве зарядных резисторов $R_{з1,2}$ устанавливают соответствующие резисторы также из магазина, как показано на рис.33.

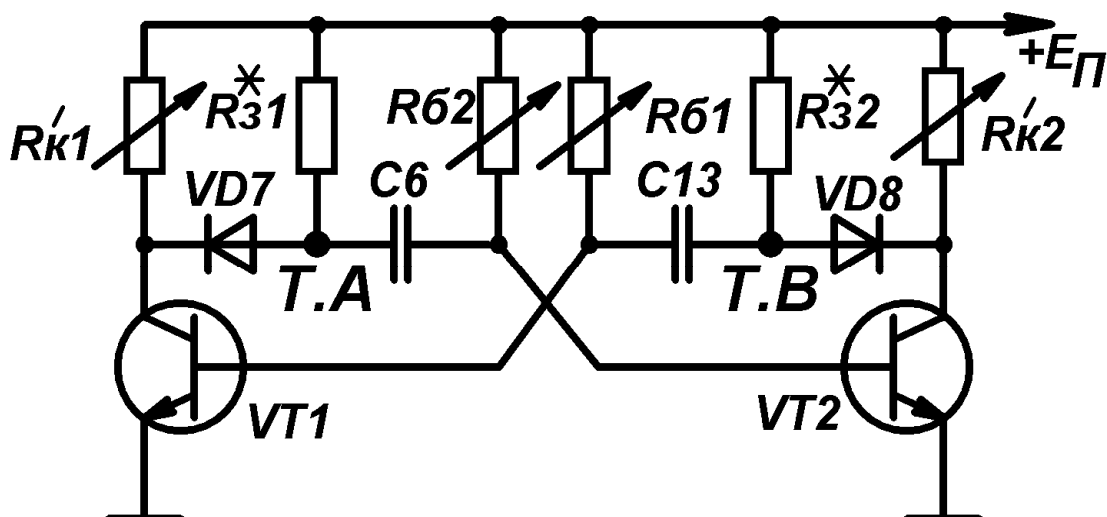


Рис.33. Схема симметричного мультивибратора с отделением цепей заряда хранирующих конденсаторов от коллекторных цепей транзисторов.

Звёздочка в обозначении зарядовых резисторов $R^*_{к1,2}$ показывает, что резисторы подбирают при настройке схемы для получения оптимальных параметров её работы (длительности фронтов и формы

импульсов). Номинальные же значения резисторов $R'_{к1,2}$ могут быть подстроены путём плавной регулировки резисторов $R_{к1,2}$.

Бичом мультивибраторов, плавно перестраиваемых в широком диапазоне частот, является риск срыва колебаний из-за попадания транзисторов в сильно насыщенный режим. На рис.34 приведена схема мультивибратора с «мягким» самовозбуждением, в которой режим работы транзисторов автоматически поддерживается в активной области вблизи насыщения.

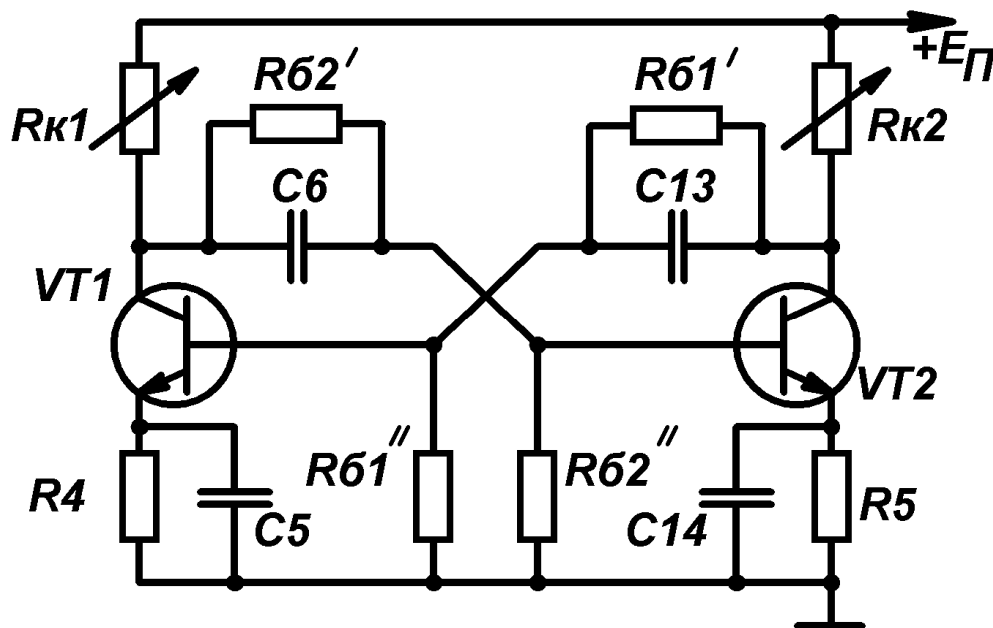


Рис.34. Схема мультивибратора с «мягким» самовозбуждением (вариант 1).

«Мягкость» режима обеспечивается включением в эмиттерные цепи транзисторов VT1 и VT2 цепочек автоматического смещения R_4C_5 и R_5C_{14} , являющихся элементами отрицательной обратной связи и автоматически фиксирующих напряжение смещения открывающегося транзистора в активной области.

Кроме того, напряжение на базовые резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ теперь подаётся не непосредственно с шины питания с неизменным напряжением, а с коллекторов транзисторов, как показано на рис.34, изменяющееся скачком при переключении транзисторов. Требуемый уровень потенциалов баз транзисторов задаётся резисторами $R''_{б1}$ и $R''_{б2}$, составляющими делители напряжения вместе с резисторами $R'_{б1}$ и $R'_{б2}$. Выбор номиналов этих резисторов обсужден в разделе 2.5.1.

Аналогично, но без цепочек отрицательной обратной связи, снижающих коэффициент использования питающего напряжения, решается задача обеспечения «мягкости» режима самовозбуждения в схеме рис.35, в которой базовые резисторы также включены в коллекторные цепи. Соответствующим выбором коэффициентов передачи делителей $R'_{к1}R''_{к1}$ и $R'_{к2}R''_{к2}$, к выходам которых подключены резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$, задаются базовые токи транзисторов на границах их областей насыщения, что позволяет схеме легко входить в автоколебательный режим. Выбор сопротивлений $R'_к$ и $R''_к$ обсужден в разделе 2.5.2.

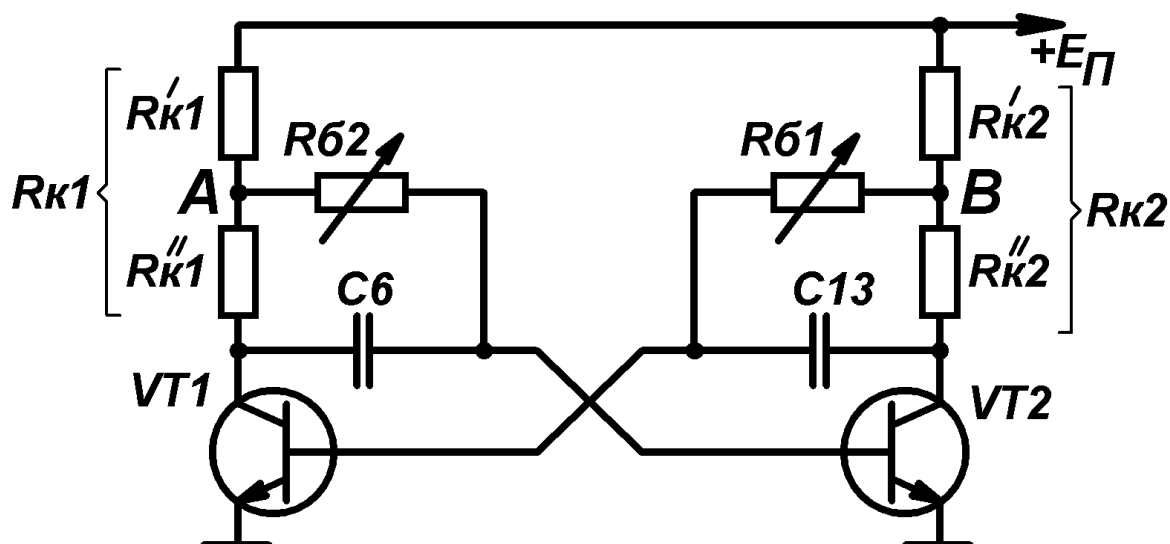


Рис.35. Схема симметричного автоколебательного мультивибратора с «мягким» самовозбуждением (вариант 2).

Для реализации этой схемы в качестве делителей $R'_K R''_K$ следует использовать переменные резисторы R_K в коллекторных цепях транзисторов $VT1$ и $VT2$, предварительно сняв перемычки между ползунками резисторов и коллекторами и подключив в резисторы R_B к ползункам резисторов R_K резисторами из магазина сопротивлений можно установить сопротивления коллекторных резисторов R_K в соответствии с расчётом по п.2.5.2

$$R_K = R'_K + R''_K,$$

а необходимые коэффициенты передачи этих делителей установить перемещением ползунков резисторов $R_{K1,2}$.

Наиболее часто симметричные мультивибраторы применяют в качестве задающих более-менее стабильных генераторов прямоугольных импульсов. При таком использовании наиболее важным (основным) их параметром является стабильность частоты генерируемых импульсов. Наименее чувствительными как к изменениям температуры, так и к колебаниям питающего напряжения являются генераторы с мостовыми времязадающими цепями.

На рис.36 показана схема реализации мультивибратора с двумя мостовыми цепями, уже собранными на макете на элементах $R_9 C_9 R_{10} VD4 R_{11} C_{10}$ и $R_{12} C_{12} VD5 C_{11} R_{13} R_{14}$.

Для исследования работы мультивибратора необходимо:

- ползунки резисторов R_{K1} и R_{K2} вновь соединить с коллекторами транзисторов $VT1$ и $VT2$, сделав таким образом резисторы R_{K1} и R_{K2} переменными;
- общую точку элементов $C_9 R_9$ соединить с базой $VT1$, а общую точку $C_{10} R_{11}$ – с коллектором $VT2$;
- общую точку элементов $C_{11} R_{14}$ соединить с базой $VT2$, а общую точку $C_{12} R_{12}$ – с коллектором $VT1$.

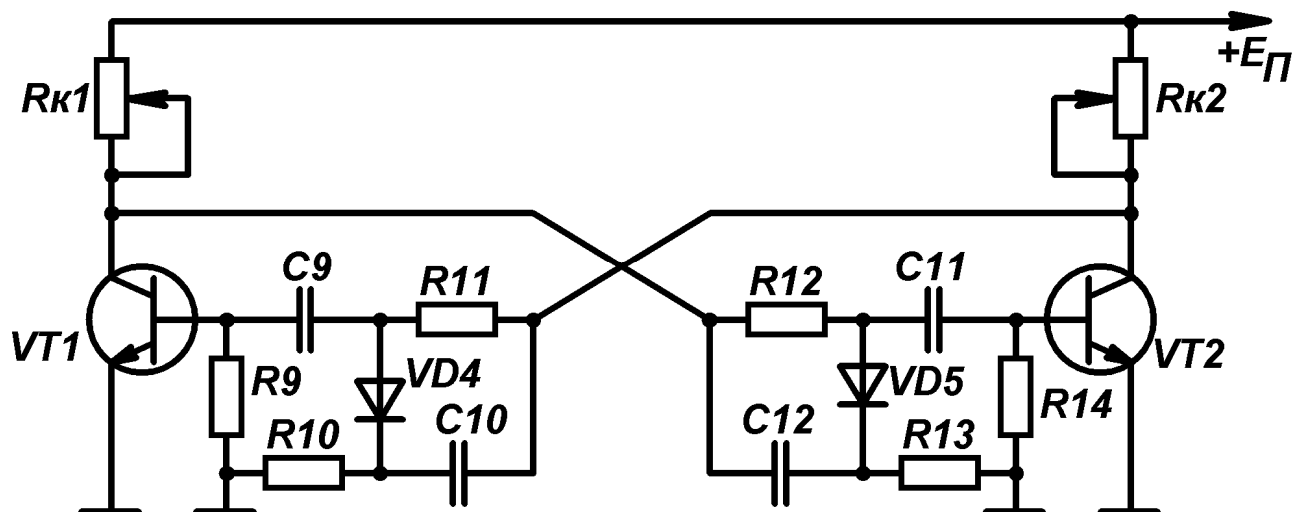


Рис.36. Схема автоколебательного мультивибратора с мостовыми времязадающими цепями.

Мультивибратор собран. Для перестройки его частоты можно изменять сопротивления и ёмкости мостов параллельным подключением элементов из магазина. Для исследования неустойчивости следует изменять величину питающего напряжения.

Мультивибратор по схеме рис.37 реализуется на тех же транзисторах VT1 и VT2, но включенных по балансной схеме. Для этого эмиттеры транзисторов следует отключить от общей шины, соединить между собой и подать на них общий эмиттерный ток от стабилизатора тока на транзисторе VT5.

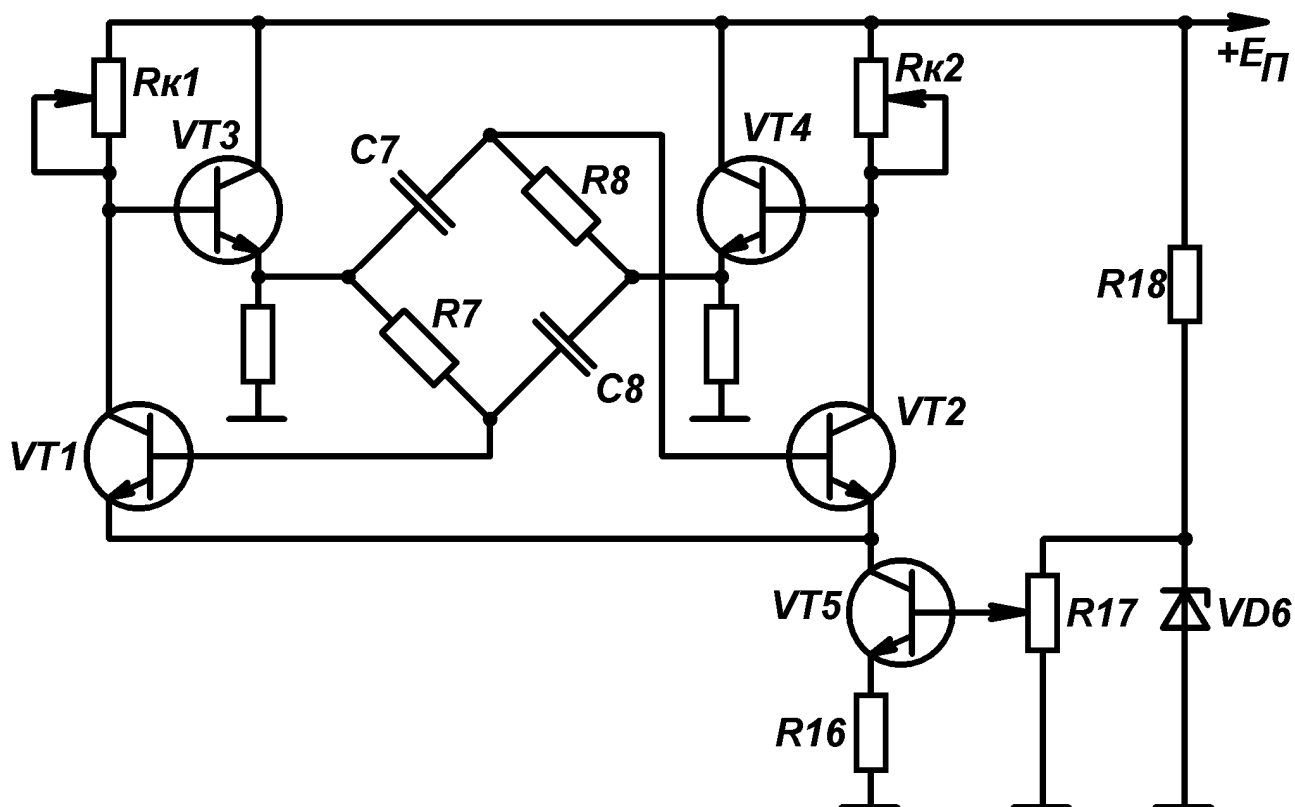


Рис.37. Схема мультивибратора на дифференциальном каскаде с общим времязадающим мостом.

Ток стабилизатора можно изменять посредством потенциометра R_{17} ($I_{Э1,2}$).

В качестве времязадающей цепи следует использовать мост на элементах $R_7C_7R_8C_8$, подключив его к коллекторам $VT1$ и $VT2$ через эмиттерные повторители на транзисторах $VT3$ и $VT4$. Для обеспечения положительной обратной связи вторую диагональ моста следует соединить с базами $VT1$ и $VT2$, как показано на рис.37.

Ждущие мультивибраторы с эмиттерной связью реализуются на тех же транзисторах $VT1$, $VT2$, для чего их эмиттеры соединяют вместе и подключают к общему проводу питания через общий эмиттерный резистор $R_Э$ (рис.38).

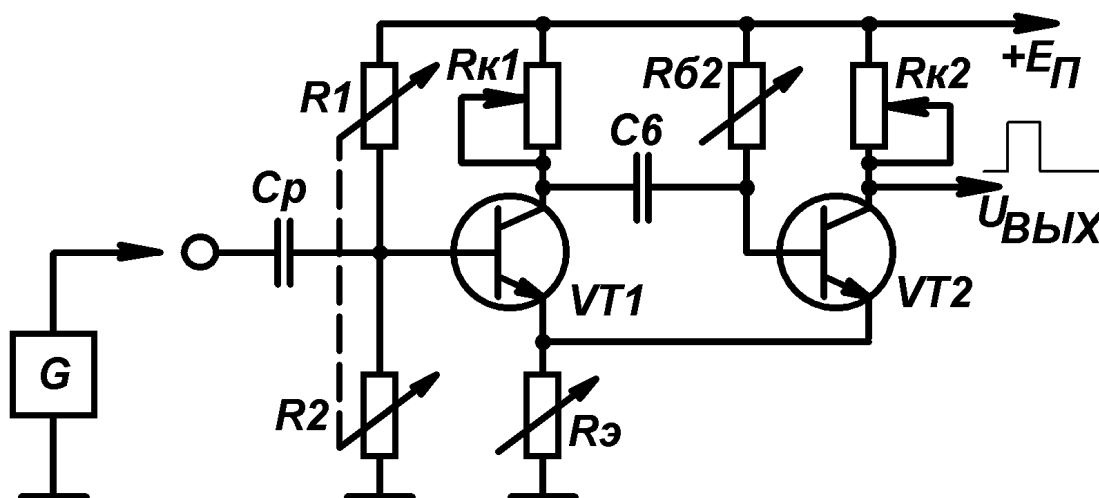


Рис.38. Схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.

Связь между $VT1$ и $VT2$ осуществляется через хранирующий конденсатор C_6 , подключенный к коллектору $VT1$ и базе $VT2$. На базу же $VT2$ подаётся и напряжение смещения от шины питания $E_П$ через переменный резистор $R_{Б2}$.

Напряжение смещения $U_{СМ}$ на базу $VT1$ задаётся от регулируемого делителя напряжения R_1R_2 , позволяющего установить смещение в диапазоне почти от нуля до $E_П$ и таким образом перевести мультивибратор или в ждущий режим (при $E_{СМ} < U'_{Э}$), или в автоколебательный (при $E_{СМ} > U'_{Э}$). Изменяя $E_{СМ}$ можно снять зависимость периода повторения импульсов в мультивибраторе с эмиттерной связью, работающем в автоколебательном режиме. Кроме того, от величины $E_{СМ}$ зависит и длительность формируемых импульсов в ждущем режиме.

Запуск мультивибратора в ждущем режиме осуществляется от импульсного генератора Г5-64 через один из разделительных конденсаторов $C_1 - C_3$, подключенный к базе $VT1$.

Для плавной регулировки длительности импульсов без изменения режима работы мультивибратора хранирующий конденсатор C_6 целесообразно подключить к ползунку $R_{К1}$ и тем самым регулировать величину отрицательного скачка напряжения, подаваемого на базу $VT2$ во время формирования импульсов (рис.39).

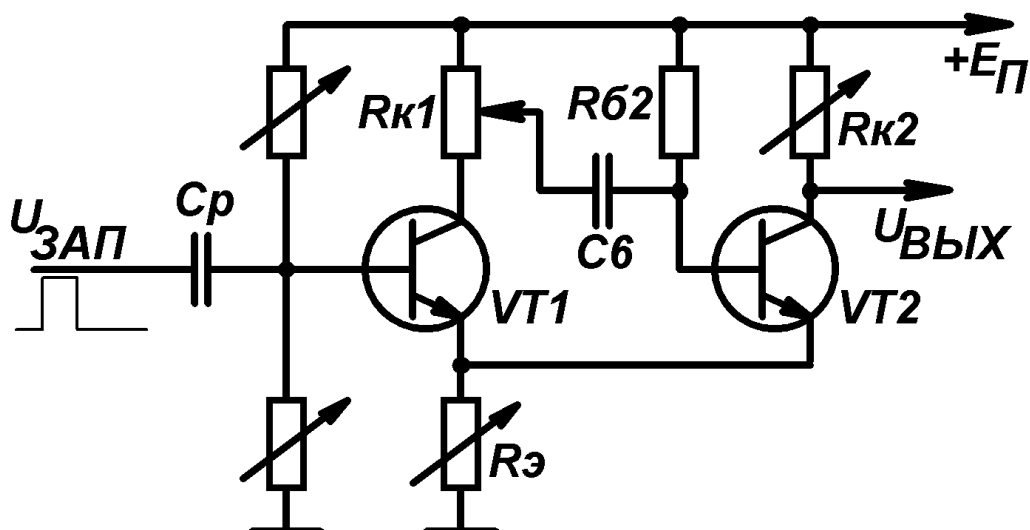


Рис.39. Схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью с плавной регулировкой длительности импульсов.

Если необходимо не положительные, а отрицательные импульсы напряжения, то их следует снимать с коллектора первого транзистора. При этом для обеспечения достаточной крутизны фронтов хранирующий конденсатор целесообразно подключить к коллектору VT1 через эмиттерный повторитель на VT3, как в ранее рассмотренных симметричных мультивибраторах (рис.40).

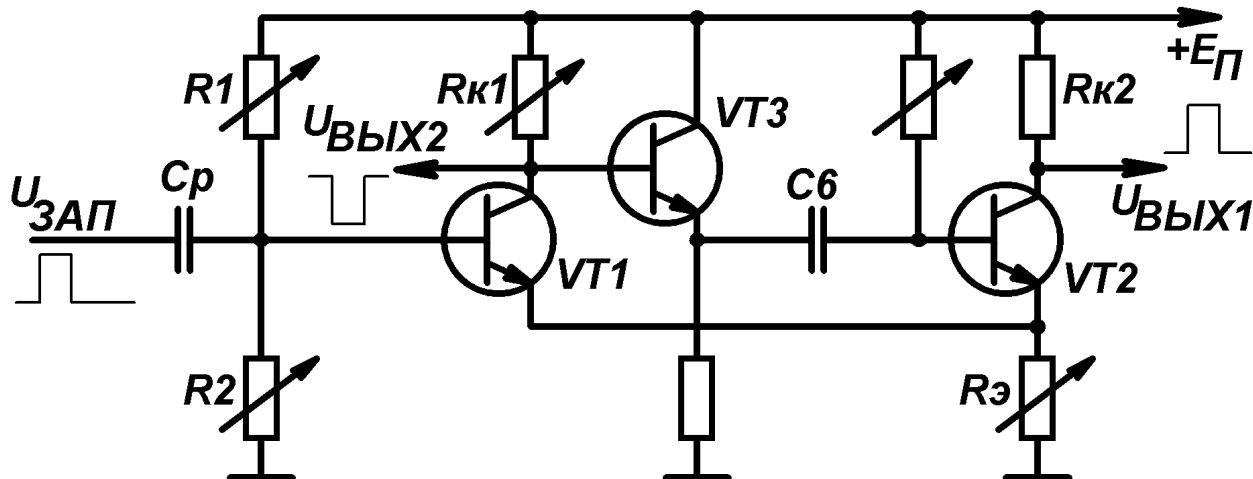


Рис.40. Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью с улучшенной формой фронтов.

Запуск ждущих мультивибраторов осуществляется положительными или отрицательными импульсами от генератора Г5-64 или аналогично ему через один из разделительных конденсаторов $C_1 - C_3$ в левом нижнем углу макета. Для этого конденсатор необходимо присоединить к одной из точек 1-5 (рис.41).

При подаче запускающего импульса в Т.4 между храниющим конденсатором C_6 и эмиттерном транзистора VT3 следует из магазина сопротивлений включить буферный резистор сопротивлением 100-200 Ом.

При подаче запускающих импульсов в Т.5 анод диода VD1 следует

соединить с коллектором транзистора VT1.
 Всё остальное – как обсуждалось ранее.

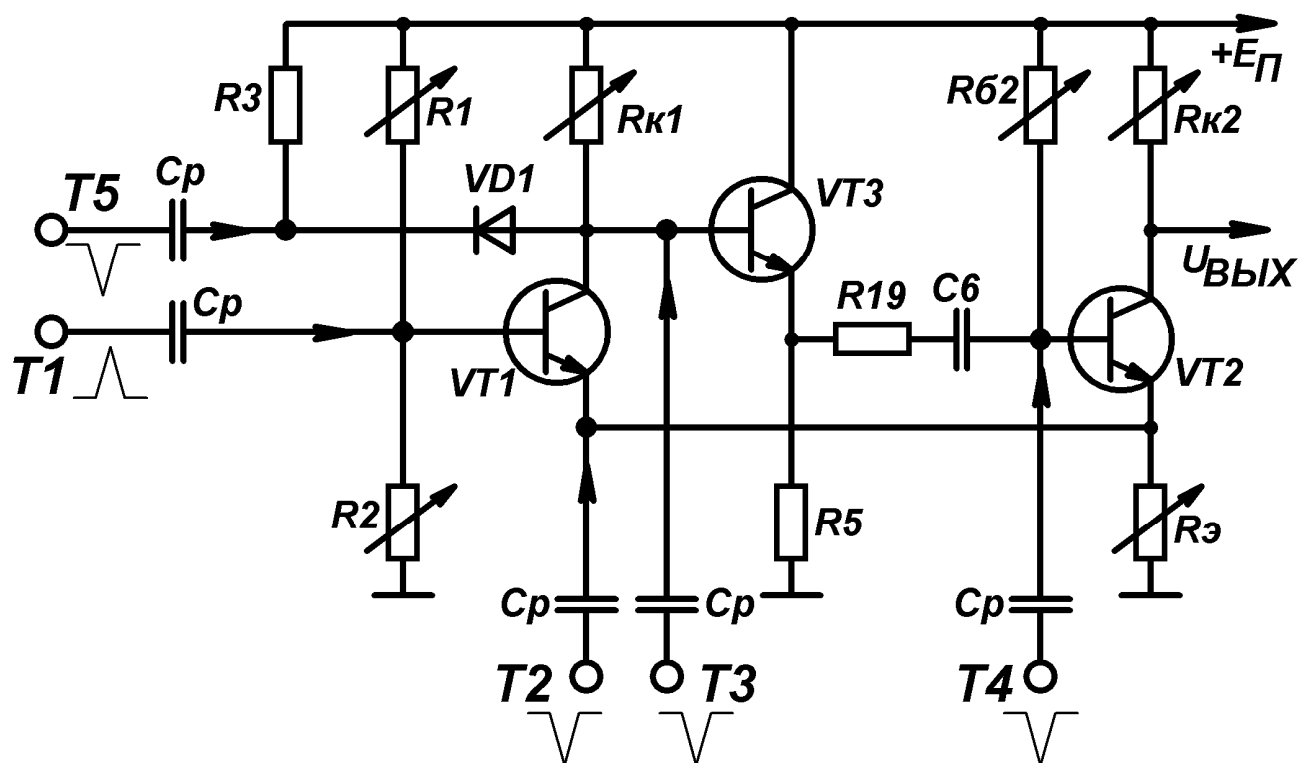


Рис.41. Возможные точки подачи запускающих импульсов в схему ждущего мультивибратора.

5. Лабораторная работа №1

Симметричный мультивибратор на транзисторах с коллекторно-базовыми связями.

Цель работы: изучить принцип действия базовой схемы мультивибратора и его основные характеристики.

Подготовка к работе.

1. Изучить разделы 1, 2.1-2.3, 2.7, 2.8, 2.9, 4 настоящего пособия.
2. Ответить на вопросы, соответствующие этим разделам (№1-26).
3. В соответствии с номером Вашего задания (Вашего номера в журнале группы) рассчитать параметры элементов базовой схемы мультивибратора (см. табл. Заданий №2).
4. Нарисовать принципиальную электрическую схему мультивибратора с указанием номиналов всех элементов. Рисунок выполнить в соответствии с ГОСТом (в качестве образца можно использовать журнал Радио).

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с лабораторным макетом «Мультивибраторы на биполярных транзисторах».
2. Как рекомендовано в разделе 4, собрать на макете базовую схему мультивибратора (рис.29) в соответствии с расчётными значениями параметров элементов.
3. Подключить к макету импульсный осциллограф С1-64, источник стабилизированного напряжения и наблюдать автоколебательный режим работы генератора. Если автоколебания не возникли – проверить правильность сборки схемы и изменяя R_B , R_K или на мгновение разорвав цепь обратной связи добиться возникновения колебаний.
4. Не подключая сопротивление нагрузки R_H , зарисовать в отчёт временные диаграммы напряжений на элементах схемы и измерить параметры импульсов. Сравнить их с расчётными.
5. Изменяя сопротивления $R_{K1,2}$ наблюдать изменения параметров импульсов. Снять зависимости $t_\Phi(R_K)$, $t_H(R_K)$.
6. Изменяя сопротивления $R_{B1,2}$ наблюдать изменение параметров импульсов и снять зависимость $t_H(R_B)$.
7. Изменяя ёмкости хранирующих конденсаторов наблюдать зависимость параметров импульсов от ёмкостей $C_{1,2}$. Снять зависимость $t_H(C)$.
8. Изменяя напряжение смещения наблюдать изменение параметров и формы импульсов от E_{CM} . Снять зависимость $F(E_{CM})$.
9. Зарисовать в отчёт рабочую схему мультивибратора с указанием номиналов её элементов (рабочие номиналы будут несколько отличаться от расчётных).

Расчётные задание к лабораторной работе №1

№ вар	$U_{\text{имп}}, \text{В}$	$T, \text{мс}$	Q	$t_{\text{и1}}, \text{мс}$	$t_{\text{и2}}, \text{мс}$	$t_{\Phi}, \text{мкс}$	$R_{\text{н}}, \text{кОм}$	$C_{\text{н}}, \text{пФ}$	$E_{\text{п}}, \text{В}$
1	5	1	2	-	-	10	10	10	10
2	6	2	3	-	-	10	10	20	10
3	7	1	4	-	-	-	10	30	15
4	8	2	2	-	-	-	5	50	15
5	9	2	-	0,5	1,5	20	15	10	20
6	10	3	2	-	-	30	15	20	20
7	11	4	-	1	3	30	15	30	20
8	12	5	-	2	3	30	20	30	25
9	14	6	-	3	3	30	20	30	25
10	16	5	2	-	-	20	20	30	25
11	18	4	-	1	3	10	20	40	25
12	20	3	-	1	3	15	20	50	30
13	22	2	2	-	-	50	25	20	30
14	25	2	-	1	1	100	30	50	30
15	5	2	3	-	-	100	5	50	15
16	6	1	2	-	-	40	5	50	15
17	7	-	-	3	2	40	5	20	15
18	8	-	-	2	3	40	6	30	15
19	9	-	-	1	4	50	6	30	15
20	10	-	-	2	4	50	6	40	15
21	12	1	2	-	-	30	7	40	20
22	15	1	2	-	-	30	8	30	25
23	10	3	3	-	-	100	8	40	25
24	8	1	2	-	-	30	5	50	20
25	6	5	2	-	-	100	3	50	15

10. Зарисовать в отчёт наиболее характерные формы импульсов с указанием условий их наблюдения и объяснить полученные данные.
11. Восстановить исходный (расчётный) режим работы, подключить непосредственно к коллектору второго транзистора сопротивление нагрузки в соответствии с таблицей заданий. Измерить новые значения $t_{\text{и1}}$, $t_{\text{и2}}$, $U_{\text{имп}}$. Снять зависимости $t_{\text{и1}}$, $t_{\text{и2}}$, $U_{\text{имп}}$ от $R_{\text{н}}$.
12. Повторить п.11 задания, но с нагрузкой, подключенной через эмиттерный повторитель. Рассчитать и сравнить с измеренными параметрами импульсов с подключенной нагрузкой.
13. Вместо $R_{\text{к}}$ или параллельно ему подключить потенциометр и, снимая импульсы обратной связи с ползунка потенциометра, снять зависимость параметров импульсов от величины $\Delta U_{\text{Б}}$ (рис.30).

Содержание отчёта.

Отчёт должен содержать:

- задание на расчёт мультивибратора в соответствии с таблицей заданий №2.
- принципиальную схему мультивибратора с указанием реальных номинальных значений элементов, с которыми проводился эксперимент;
- пояснения отличий реальных номиналов элементов от расчётных;
- таблицы, графики и временные диаграммы, полученные при выполнении работы;
- выводы по работе.

6. Лабораторная работа №2

Методы улучшения параметров импульсов, генерируемых симметричным мультивибратором на транзисторах.

Цель работы: исследовать причины нестабильности генерируемых импульсов симметричным мультивибратором и познакомиться с методами стабилизации.

Подготовка к работе.

1. Изучить разделы 2.4, 2.5, 2.6, 4 настоящего пособия.
2. Ответить на вопросы, соответствующие указанным разделам (вопросы №20-31).
3. Восстановить на макете базовую схему, которая исследовалась в работе №1.
4. Повторно снять основные параметры импульсов по базовой схеме: $t_{и1}$, $t_{и2}$, t_{ϕ} , $t_{восст}$, $U_{имп}$.
5. В соответствии с разделом 2.4.1 пособия, используя эмиттерные повторители по схеме рис.31, измерить новые значения $t_{и}$, t_{ϕ} , $t_{восст}$, $U_{имп}$.
6. В соответствии с разделом 2.4.2 пособия подключить коллекторы транзисторов через шунтирующие диоды к источнику опорного напряжения (рис.32). Изменяя $E_{оп}$ от 3В до $E_{п}$ наблюдать изменение формы и параметров выходных импульсов. Измерить зависимость $t_{\phi}(E_{оп})$ при нескольких значениях $E_{п}$. Зарисовать наиболее характерные временные диаграммы $U_{к}$. Объяснить полученные результаты.
7. В соответствии с разделом 2.4.3 пособия отделить цепи заряда хронизирующих конденсаторов от коллекторов транзисторов. Наблюдать эффект уменьшения длительности фронтов импульсов. Рассчитать необходимые сопротивления резисторов. Зарисовать формы импульсов на коллекторах и в т.т.А и В (рис.33). Измерить времена заряда хронизирующих конденсаторов и сравнить их с длительностями фронтов.
8. Возвратиться к исходной схеме и, изменяя $E_{п}$ и $R_{б}$, наблюдать эффект срыва колебаний. Пересчитать схему в соответствии с разделом 2.5.1 пособия и, собрав её на макете (рис.34), достиг устойчивого автоколебательного режима при изменении $E_{п}$. Отразить это в отчёте в виде таблиц и графиков.
9. Пересчитать базовую схему в соответствии с разделом 2.5.2 пособия и, собрав на макете мультивибратор с управляемым смещением, исследовать «мягкость» его режима самовозбуждения (рис.34).
10. Возвратиться к исходной схеме и, изменяя $E_{п}$ и $E_{см}$, снять зависимости частоты колебаний от этих напряжений.
11. Пересчитать схему в соответствии со схемой рис.34. Собрать схему на макете и, изменяя $E_{п}$, снять зависимость $F(E_{п})$.
12. Повторить п.10 задания для схемы рис.35. Объяснить полученные результаты.
13. Возвратиться к базовой схеме и, изменяя температуру транзисторов

от комнатной до 90°C, снять зависимость частоты колебаний от температуры.

14. Собрать одну из схем по рисункам 36 или 37 и вновь снять зависимость частоты колебаний от температуры. Просмотреть временные диаграммы напряжений на элементах мостов и базах транзисторов. Сравнить результаты измерений с результатами по п.13.

Содержание отчёта.

Отчёт должен содержать:

- задание на расчёт мультивибратора в соответствии с таблицей заданий №2;
- принципиальные схемы исследованных мультивибраторов с указанием номиналов реально использованных элементов и напряжений;
- таблицы, графики и временные диаграммы, полученные при выполнении работы;
- выводы по пунктам работы.

7. Лабораторная работа №3

Исследование работы ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.

Цель работы: ознакомиться со схемотехникой и принципом работы ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.

Подготовка к работе.

1. Изучить разделы 3.1-3.5 настоящего пособия.
2. Ответить на контрольные вопросы по работе №3.
3. В соответствии с номером Вашего задания в таблице заданий №3 рассчитать параметры элементов базовой схемы ждущего мультивибратора с эмиттерной связью.
4. Нарисовать принципиальную схему мультивибратора с указанием расчётных значений номиналов всех элементов.

Порядок выполнения работы.

1. Из установленных на макете деталей с параметрами, наиболее близкими к расчётным, собрать схему мультивибратора с эмиттерной связью (рис.38). Схему с расчётными параметрами привести в отчёте.
2. Подать на макет питающее напряжение и сигналы запуска от генератора Г5-64. Для начала эксперимента в качестве запускающих использовать импульсы длительностью не более 1 мкс.
Добиться устойчивого запуска, зарисовать в отчёт наиболее характерные временные диаграммы напряжений на электродах схемы. Объяснить их. Измерить параметры генерируемых импульсов и сравнить их с расчётными.
3. Изменяя опорное напряжение от нуля до $0,8E_{п}$ наблюдать переход мультивибратора из ждущего режима в автоколебательный. Зарисовать наиболее характерные временные диаграммы в обоих режимах и объяснить физику работы мультивибратора в них.
4. Изменяя сопротивление $R_{Б2}$ и хранирующую ёмкость, снять зависимости $t_{и}(R_{Б})$ и $t_{и}(C_0)$. Измерить длительность стадии восстановления $t_{восст}$. Измерить длительности фронтов импульса.
5. Включить в цепь коллектора VT1 переменный резистор (рис.39), снять сигнал обратной связи с его ползунка и, перемещая ползунок, снять зависимость $t_{и}$ от положения ползунка (от величину сигнала обратной связи).
6. В цепь перезарядки хранирующего конденсатора включить эмиттерный повторитель и измерить $t_{ф}$ и $t_{восст}$ (рис.40). Результат сравнить с этими же параметрами базовой схемы.
7. Подавая сигналы запуска в различные точки схемы в соответствии с рис.41 просмотреть работу мультивибратора. Объяснить пути прохождения запускающих импульсов.

8. Изменяя длительность запускающих импульсов от 0,5 мкс до $t_{\text{ЗАП}} > t_{\text{И}}$, $t_{\text{ВОССТ}}$ изучить влияние длительности запускающих импульсов и частоты их повторения на работу мультивибратора в ждущем режиме. Объяснить увиденное.

Таблица №3

Расчётные задание к лабораторной работе №3

№ вар	$U_{\text{ИМП}}$, В	$t_{\text{И}}$, мкс	$t_{\text{Ф МАКС}}$, мкс	$T_{\text{ЗАП}}$, мкс	$R_{\text{Н}}$, кОм	$C_{\text{Н}}$, пФ	$E_{\text{П}}$, В	диапазон регулировки $t_{\text{И}}$, мкс
1	5	10	1	100	10	100	20	-
2	6	10	2	150	10	100	20	-
3	7	-	0,5	100	15	50	20	3-6
4	8	-	1	100	20	10	20	5-10
5	9	3	1	20	10	-	20	-
6	10	3	1	30	15	-	24	-
7	11	5	1	20	15	10	24	-
8	12	-	2	40	20	-	24	5-15
9	15	-	2	40	20	10	30	5-10
10	14	-	1	30	100	20	30	10-15
11	13	20	2	30	80	20	30	-
12	12	30	3	50	80	30	30	-
13	11	40	4	100	50	100	25	-
14	10	-	10	500	20	50	25	50-200
15	9	100	20	500	20	200	25	-
16	8	-	10	500	20	100	20	20-200
17	7	200	20	300	30	100	20	-
18	6	300	30	3000	20	200	20	-
19	5	15	3	30	10	15	15	-
20	7	300	10	800	15	200	15	-
21	9	500	40	1000	30	200	20	-
22	12	10	2	1000	100	10	20	-
23	13	10	3	100	100	10	25	-
24	14	-	5	100	50	10	30	10-20
25	15	-	100	1000	100	20	30	10-50