

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Схемотехника

Лабораторный практикум

Разработчики:

ст. преподаватель каф. ПрЭ

А.В.Топор

Студент каф.ПрЭ

А.В. Бахмет

ТОМСК 2018

Топор А.В.

Схемотехника. Лабораторный практикум / А.В. Топор, А.В. Бахмет; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 55 с.: ил., табл., прил. – Библиогр.: с. 50.

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

В рамках дисциплины реализуются следующие **задачи**:

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

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА.....	4
1.1. Источник питания.....	4
1.2. Генератор импульсов.....	5
1.3. Осциллограф.....	7
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЮЩИЕ ЦЕПИ.	
Лабораторная работа №1	9
2.1. Основные теоретические сведения.....	9
2.2. Методика проведения измерений.....	13
2.3. Описание лабораторного макета.....	15
2.4. Программа работы.....	15
2.5. Контрольные вопросы.....	17
2.6. Содержание отчета.....	17
3. ЭЛЕКТРОННЫЙ КЛЮЧ. Лабораторная работа №2.....	18
3.1. Основные теоретические сведения.....	18
3.2. Методика проведения измерений.....	24
3.3. Описание лабораторного макета.....	25
3.4. Программа работы.....	26
3.5. Контрольные вопросы.....	27
3.6. Содержание отчета.....	28
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЖДУЩЕГО МУЛЬТИВИБРАТОРА И ТРИГГЕРА ШМИДТА.	
Лабораторная работа №3	29
4.1. Основные теоретические сведения.....	29
4.2. Методика проведения измерений.....	34
4.3. Описание лабораторного макета.....	35
4.4. Программа работы.....	36
4.5. Контрольные вопросы.....	38
4.6. Содержание отчета.....	38
5. ГЕНЕРАТОР ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ. Лабораторная	
работа №4.....	39
5.1. Основные теоретические сведения.....	39
5.2. Простейший ГЛИН.....	40
5.3. Методика проведения измерений.....	45
5.4. Описание лабораторного макета.....	46
5.5. Программа работы.....	47
5.6. Контрольные вопросы.....	49
5.7. Содержание отчета.....	49
Список литературы.....	50

1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

В ходе выполнения лабораторных работ по дисциплине «Схемотехника» предполагается использование лабораторного стенда (Рис. 1), состоящего из следующих лабораторных приборов:

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

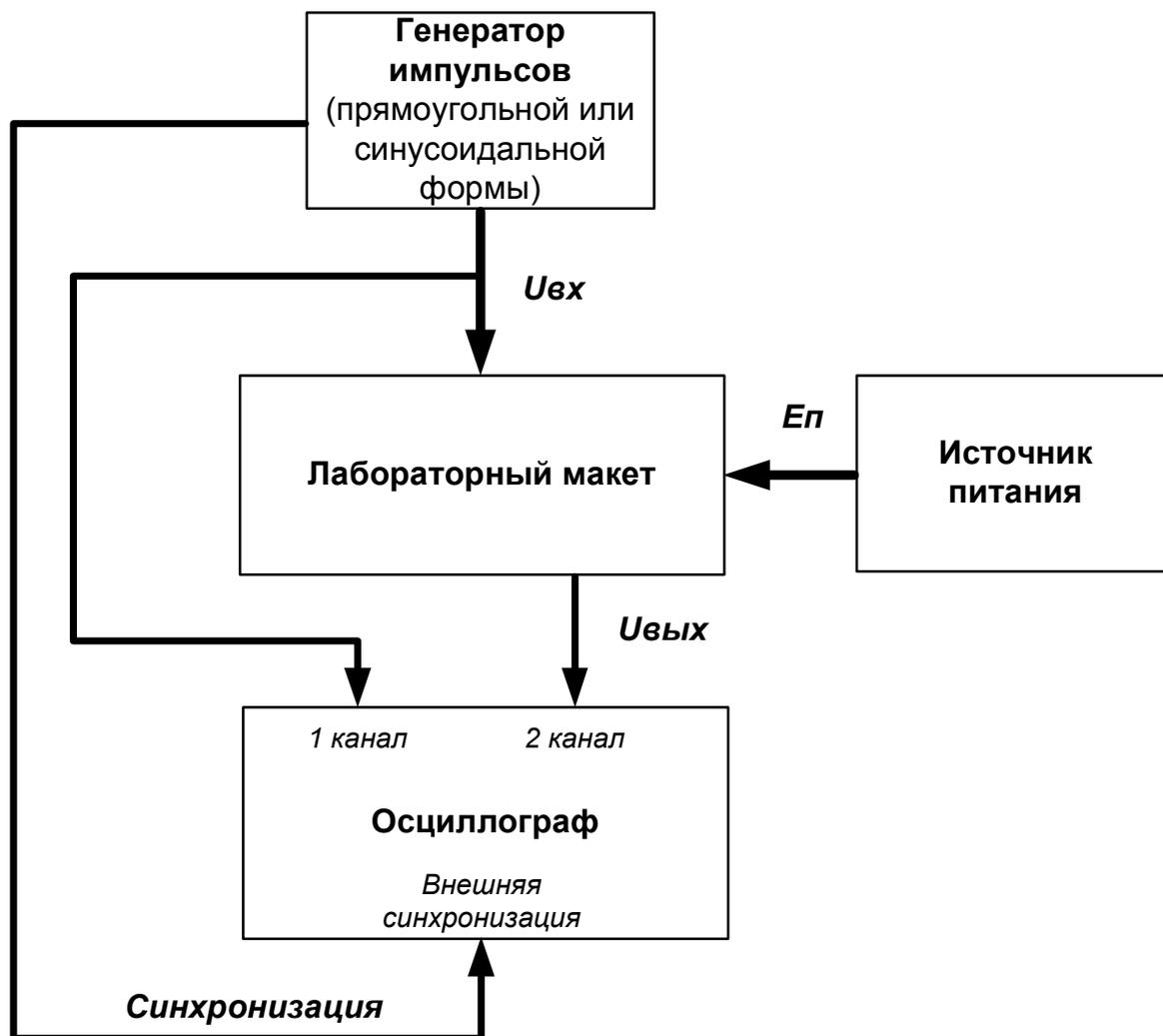


Рис. 1 Структурная схема лабораторного стенда

1.1. Источник питания

С помощью источника (Рис. 2) осуществляется питание лабораторных макетов с возможностью регулировки напряжения питания $0 \div 20$ В. Включение источника питания производится тумблером (Рис. 2 – 1). Для подключения лабораторного макета имеется специальный разъем (Рис. 2 – 2).

Установка напряжения питания производится регулятором (Рис. 2 – 3) с помощью встроенного вольтметра (Рис. 2 – 4).



Рис. 2 Лицевая панель источника питания:

1 — выключатель сети; 2 — разъем для подключения лабораторных макетов; 3 — регулировка 0÷20 В; 4 — встроенный вольтметр

1.2. Генератор импульсов

Генераторы импульсов в рамках данного лабораторного практикума используются для подачи сигналов с заданными параметрами (амплитуда, частота, длительность, временной сдвиг) на вход исследуемых схем. В лаборатории имеются генераторы двух видов:

- генератор прямоугольных импульсов Г5-54 (Рис. 3);
- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-112/1 (Рис. 4).

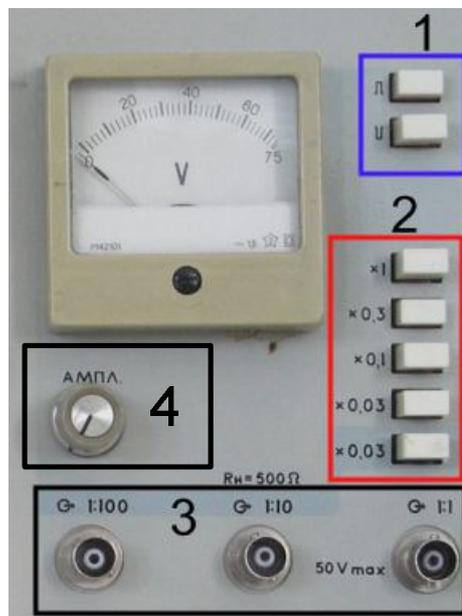
1.2.1. Генератор прямоугольных импульсов

Лицевая панель генератора прямоугольных импульсов Г5-54 приведена на Рис. 3. Частота повторения, временной сдвиг и длительность импульсов устанавливаются с помощью соответствующих лимбов с учетом выбранного множителя. На лимбах две шкалы — белая и черная, параметры устанавливаются по той шкале, клавиша множителя которой нажата.

Переключатели временного сдвига позволяют осуществить задержку выходных импульсов относительно импульса синхронизации.



а



б

Рис. 3 Лицевая панель генератора прямоугольных импульсов Г5-54

Установка амплитуды выходных импульсов осуществляется дискретно с помощью набора переключателей (Рис. 3, б – 2) и плавно ручкой потенциометра «АМПЛ» (Рис. 3, б – 4). Амплитуда выходных импульсов контролируется осциллографом. Выходы **1:10** и **1:100** работают только тогда, когда нажата клавиша **x0,03**. Полярность выходных импульсов устанавливается переключателями (Рис. 3, б – 1).

1.2.2. Генератор сигналов низкочастотный

В случаях, когда на вход схемы необходимо подать синусоидальное напряжение следует использовать генератор низкочастотных сигналов (Рис. 4).



Рис. 4 Лицевая панель генератора прямоугольных импульсов ГЗ-112/1

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

1.3. Осциллограф

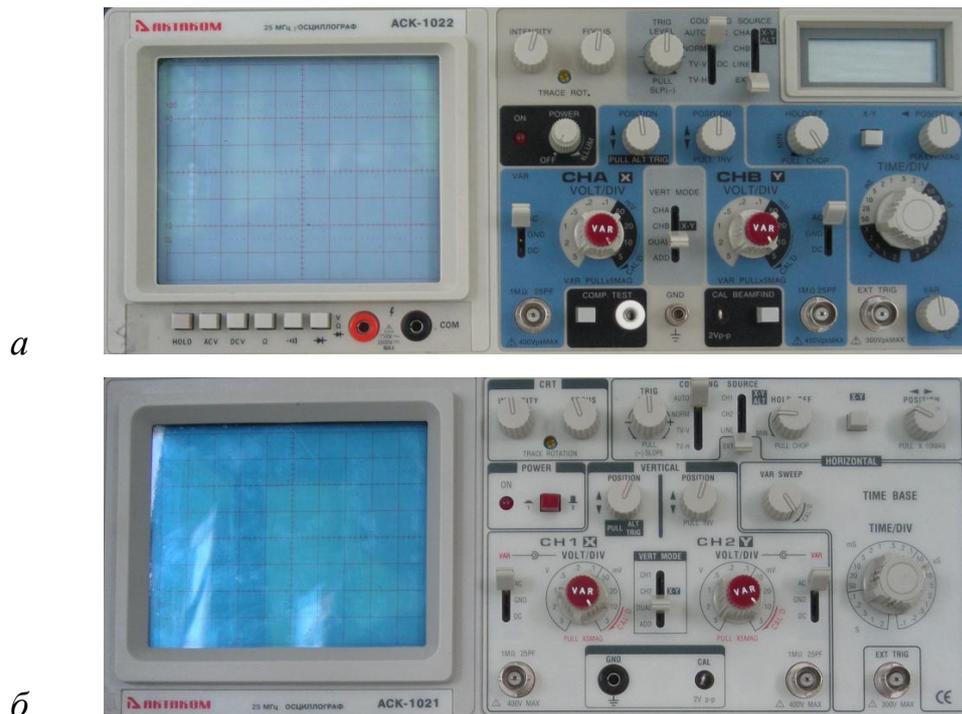


Рис. 5 Лицевые панели осциллографов

В лаборатории электронных цепей имеется два вида осциллографов (Рис. 5, а и Рис. 5, б), имеющих незначительные отличия.

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

Назначение основных органов управления осциллографом представлены на схеме (Рис. 6):

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

CH1 — по сигналу 1-го канала;

CH2 — по сигналу 2-го канала;

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

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

AC — переменный сигнал;

GND — земля;

DC — постоянный сигнал.

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

CH1 — первый канал;

CH2 — второй канал;

DUAL — двухканальный;

ADD — геометрическая сумма сигналов первого и второго каналов.

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

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

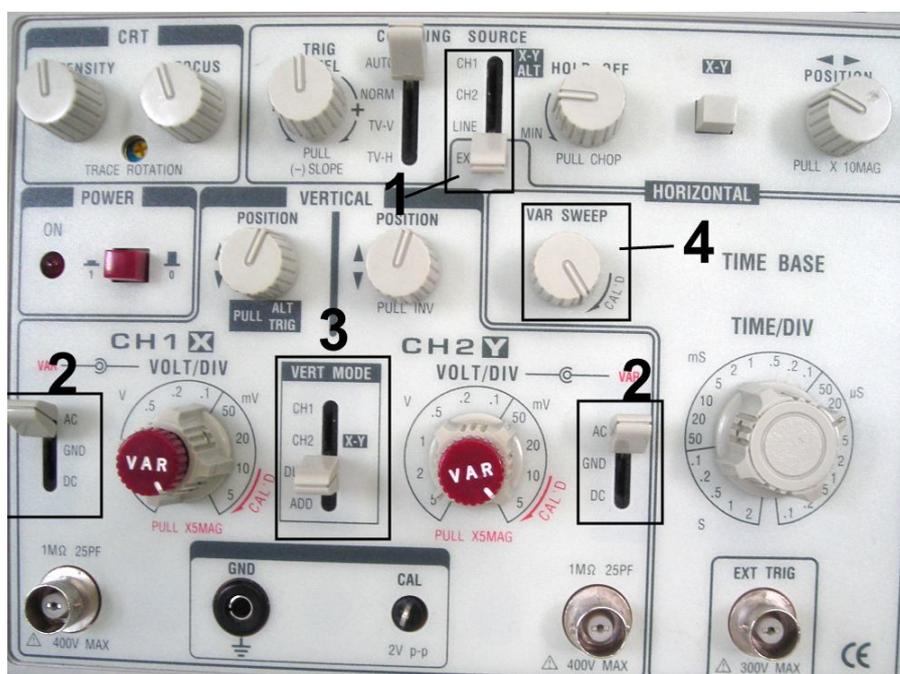


Рис. 6 Основные органы управления осциллографом

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЮЩИЕ ЦЕПИ. Лабораторная работа №1

Целью работы является:

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

- а) делительную,
- б) дифференцирующую,
- в) интегрирующую.

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

2.1. Основные теоретические сведения

В импульсной технике для преобразования импульсов широко используются RC -цепи, которые в зависимости от параметров сопротивления R и емкости C , а также от способа снятия выходного сигнала могут выполнять функции делительных, укорачивающих (дифференцирующих) и интегрирующих цепей.

2.1.1. Дифференцирующие (укорачивающие) и делительные RC -цепи

Рассматриваемые цепи состоят из последовательно соединенных конденсатора C (со стороны входа) и резистора R , с которого и снимается выходной (преобразованный) сигнал. На Рис. 7 представлена такая цепь и диаграммы напряжений.

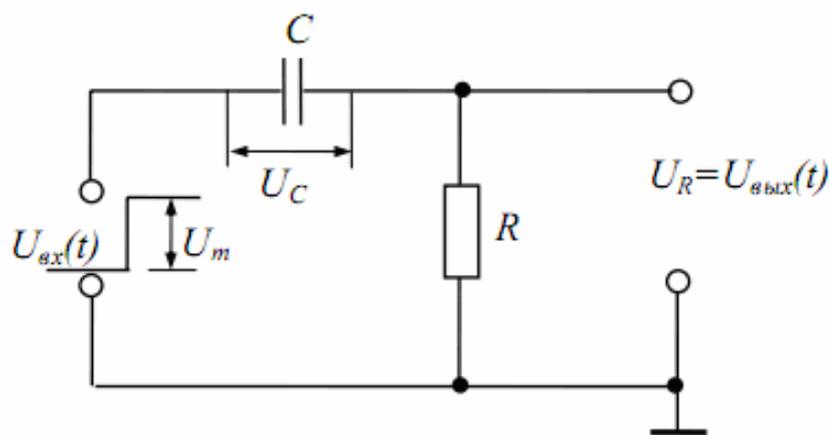
Делительная цепь используется для передачи сигнала с минимальными искажениями, пропускает только переменную составляющую сигнала.

Дифференцирующая цепь используется для получения из одного импульса двух коротких различной полярности.

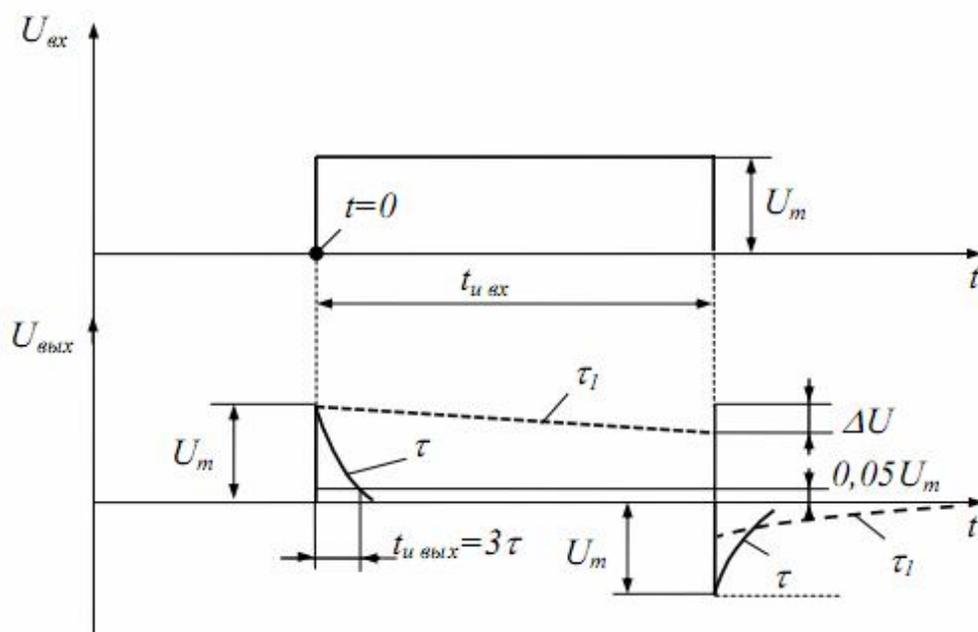
В любой момент времени для цепи справедливо соотношение:

$$U_{\text{вх}} = U_R + U_C \quad (2.1)$$

Конденсатор не может зарядиться мгновенно, и поэтому в момент времени $t = 0$ напряжение на конденсаторе $U_C = 0$ и все напряжение источника $U_{\text{вх}}$ падает на резисторе $U_R = U_{\text{вх}}$. Ток заряда будет при этом наибольшим $I_{\text{з max}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R}$. На диаграммах (Рис. 7, б) можно видеть изменение $U_{\text{вых}}$ в процессе заряда (разряда) конденсатора.



а



б

Рис. 7 Дифференцирующая (разделительная) цепь (а) и ее временные диаграммы (б)

Закономерности изменения тока, напряжений U_C и U_R представляются экспоненциальными зависимостями:

$$U_R(t) = U_m \cdot e^{-t/RC}, \quad (2.2)$$

$$U_C(t) = U_m - U_R(t) = U_m(1 - e^{-t/RC}),$$

где $\tau = RC$, а $e = 2,71$ — основание натурального логарифма.

В случае, когда $t_u \gg \tau$, цепь выполняет функции **дифференцирующей (укорачивающей)**, на выходе образуется остrokонечный импульс, длительность которого можно задавать на уровне U_u (Рис. 7, а) и в соответствии с выражением (2.1) имеем:

$$U_u = U_m \cdot e^{-\frac{tu_{\text{вых}}}{\tau}}, \quad t_u = \tau \cdot \ln \frac{U_m}{U_u}. \quad (2.3)$$

При $U_u = 0,5U_m$, $tu_{\text{вых}} = \tau \cdot \ln 2 = 0,7\tau$.

При $U_u = 0,05U_m$, $tu_{\text{вых}} = \tau \cdot \ln 20 = 3\tau$.

Для того, чтобы реальная цепь была дифференцирующей необходимо выполнить условие $t_u > 3RC$.

Выходное сопротивление генератора питающих импульсов — R_i и паразитная емкость со стороны нагрузки — C_n могут существенно изменить амплитуду и длительность импульсов. Оценим их влияние на выходные параметры:

$$U_{\text{вых}}(0) = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R}{R + R_i}, \quad t_{\text{увых}}(0,05U_m) \approx 3C \cdot (R + R_i); \quad (2.4)$$

$$U_{\text{вых}}(0) = U_{\text{вх}} \cdot \frac{C}{C + C_n}, \quad t_{\text{увых}}(0,05U_m) \approx 3C \cdot (C + C_n).$$

В случае, когда постоянная рассматриваемой RC -цепи оказывается много больше длительности импульсов ($t_u \ll RC$), действующих на входе, цепь выполняет функцию **разделительной**. Выходной сигнал при этом по форме повторяет входной (Рис. 7, б), а искажение определяется соотношением:

$$\gamma \approx \frac{\Delta U}{U_m} \approx \frac{t_u}{\tau_1}. \quad (2.5)$$

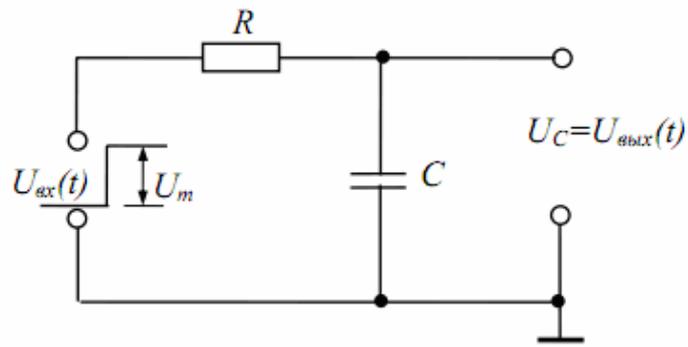
Очевидно, что для получения относительного спада вершины импульса меньше 1 % необходимо выбрать постоянную времени, по крайней мере, в 100 раз больше длительности импульса.

2.1.2. Интегрирующая цепь

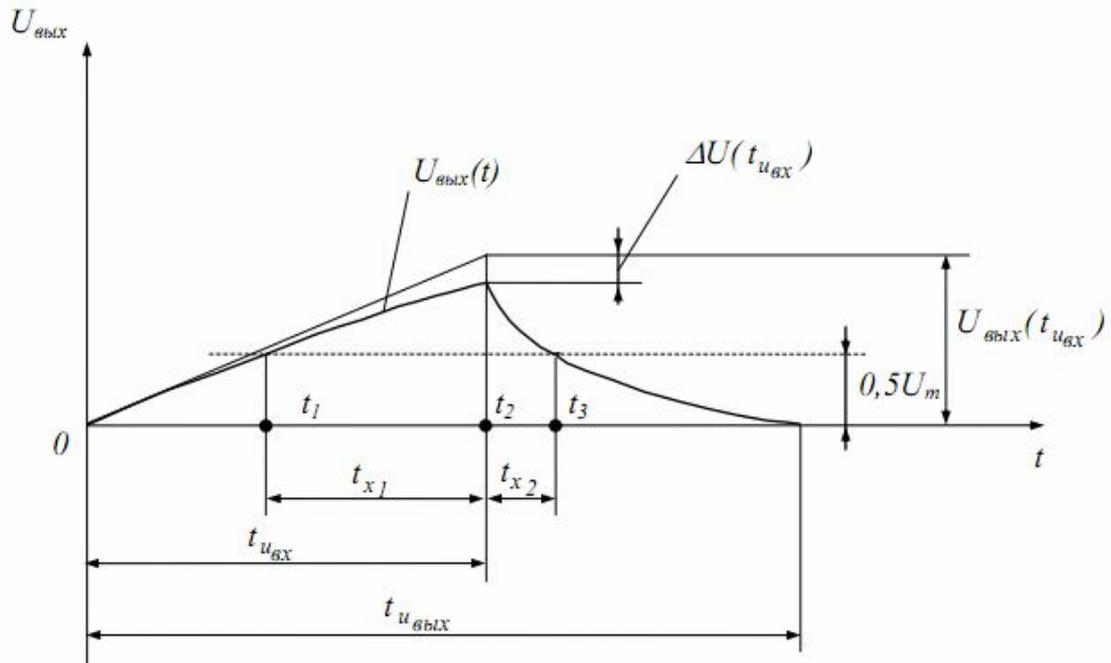
Простейшим интегрирующим элементом можно считать конденсатор или индуктивную катушку. На Рис. 8, а показана RC -цепь, в которой напряжение снимается с конденсатора.

При $\tau \gg t_u$ выходное напряжение на интервале $0 \leq t \leq t_{\text{увх}}$ определяется соотношением:

$$U_{\text{вых}}(t) = U_m (1 - e^{-t/\tau}) \approx U_m \left(\frac{t_u}{\tau} - \frac{t_u^2}{2\tau^2} \right) + \frac{t_u^3}{3\tau^3} + \dots \quad (2.6)$$



a



б

Рис. 8 Интегрирующая цепь (a) и ее временные диаграммы (б)

Напряжение, соответствующее результату точного интегрирования, определяется по формуле:

$$U_{\text{вых}}(t_{\text{увых}}) = \frac{U_m \cdot t_{\text{увых}}}{\tau}. \quad (2.7)$$

Максимальная погрешность интегрирования определяется как:

$$\Delta U(t_{\text{увых}}) = \frac{U_m \cdot t_{\text{увых}}^2}{2\tau^2}. \quad (2.8)$$

Относительная погрешность определяется как:

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} = \frac{t_u}{2\tau}. \quad (2.9)$$

По окончании входного сигнала $t_{\text{увх}}$ выходное напряжение на конденсаторе изменяется по закону:

$$U_{\text{вых}}(t) = U_m \left(1 - e^{-\frac{t-t_{\text{вх}}}{\tau}} \right) e^{-\frac{t-t_{\text{вх}}}{\tau}}. \quad (2.10)$$

Длительность выходного сигнала с интегрирующей цепи (Рис. 8, б) оценивается двумя составляющими:

$$t_{\text{увых}} = t_{\text{вх}} + 3RC. \quad (2.11)$$

На практике часто необходимо рассчитать длительность определенного временного интервала выходного сигнала (Рис. 8, б).

Определим, например, интервал от 0 до t_1 на уровне $0,5U_m$:

$$t = (0 - t_1) = \tau \ln \frac{U(\infty) - U(0)}{U(\infty) - U(t_1)}, \quad (2.12)$$

принимаем $U(\infty) = U_m$, $U(0) = 0$; $U(t_1) = 0,5U_m$;

тогда $t = (0 - t_1) = \tau \ln 2 \approx 0,7\tau$.

Реальная интегрирующая RC -цепь содержит сопротивление нагрузки R_n , включенное параллельно конденсатору.

Применяя теорему об эквивалентном генераторе схему можно определить эквивалентное сопротивление и эквивалентное напряжение для реальной интегрирующей цепи:

$$R_{\text{э}} = \frac{R_n \cdot R}{R_n + R}, \quad U_{\text{э}}(t) = \frac{U_{\text{вх}}(t) \cdot R_n}{R_n + R}. \quad (2.13)$$

Очевидно, что включение R_n приводит к уменьшению величины выходного сигнала на момент окончания входного сигнала и увеличению ошибки интегрирования.

2.2. Методика проведения измерений

Для проведения измерений используется осциллограф, основные органы управления которого приведены на Рис. 6.

Рекомендуемая последовательность действий при снятии временных характеристик:

1. Подключить один из каналов осциллографа ко входу макета, второй — к выходу. Установить на каждом из каналов режим DC (Рис. 6 – 2) и выбрать двухканальный режим DUAL MODE (Рис. 6 – 3).

2. Перевести осциллограф в режим внешней синхронизации с генератором импульсов (соединить вывод генератора «Синхроимпульсы» со входом осциллографа «EXT TRIG» и перевести соответствующий тумблер в положение EXT, как показано на Рис. 6 – 1).

3. Добиться максимально развернутого и четкого изображения на экране осциллографа. При этом нужно использовать регуляторы Volt/DIV

для каждого канала, развертку по времени TIME/DIV, а также TRIG LEVEL, FOCUS, INTENSITY.

4. Если осциллограф имеет регулятор VAR SWEEP установить его в максимальное положение. Провести измерения, руководствуясь данными:

а) для определения величины спада плоской вершины импульса (разделительная цепь) — Рис. 9.

б) для определения абсолютной погрешности интегрирования (интегрирующая цепь) — Рис. 9, при этом снимать выходной сигнал необходимо с резистора

в) для определения длительности импульса на необходимом уровне напряжения (дифференцирующая цепь) — Рис. 10.

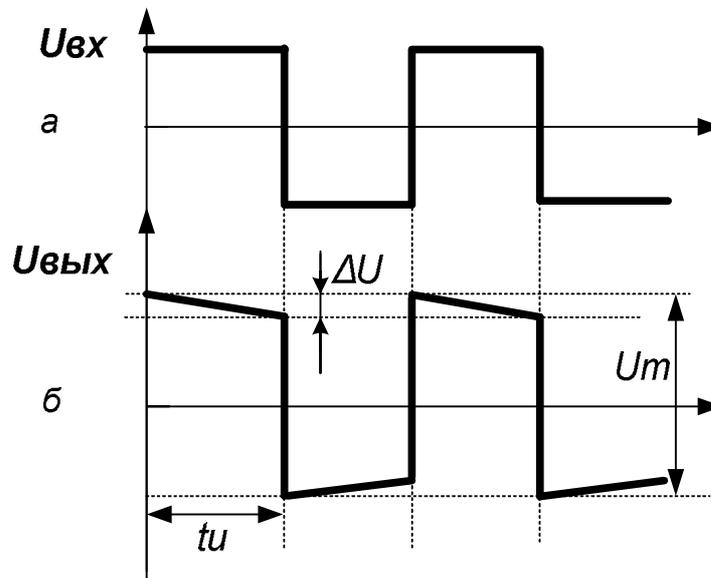


Рис. 9 Временные диаграммы входного (а) и выходного (б) напряжений разделительной цепи

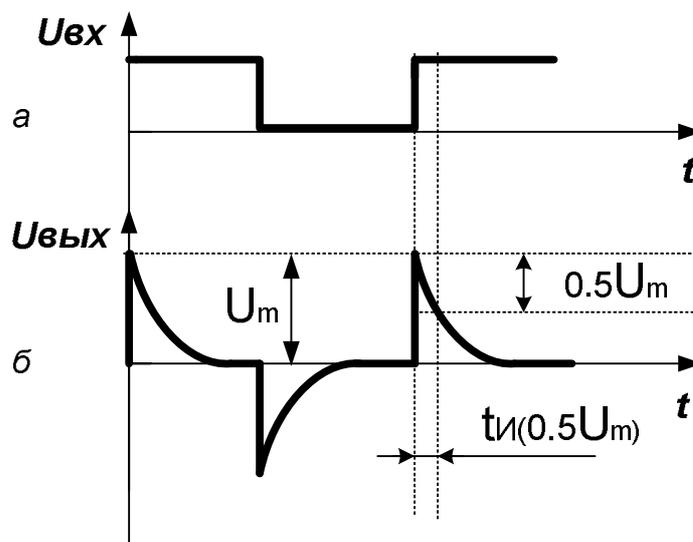


Рис. 10 Временные диаграммы входного (а) и выходного (б) напряжений дифференцирующей цепи

2.3. Описание лабораторного макета

Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на Рис. 1.

Лабораторный макет «Формирующие цепи» выполнен в отдельном корпусе. На лицевой панели лабораторного макета представлены 2 типа формирующих цепей, четыре 4-х позиционных переключателя, а также переключатель SA1. Лабораторный макет не требует подключения к источнику питания, для запуска достаточно подать прямоугольные импульсы с генератора импульсных сигналов на вход одной из цепей.

Четыре 4-х позиционных переключателя позволяют подключить необходимые номиналы C1, C2, R1, R2 соответственно. С помощью переключателя SA1 можно подключать нагрузку R_н к выходу цепи. Положение ВВЕРХ переключателя SA1 соответствует режиму ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО. Номиналы элементов схемы приведены в приложении 1.

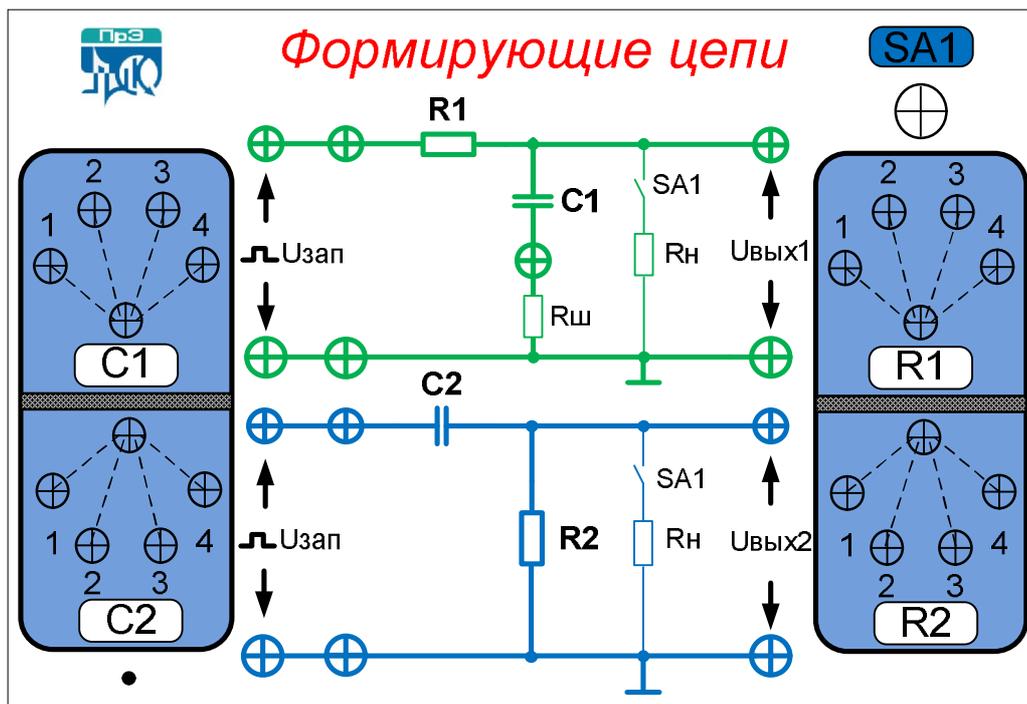


Рис. 11 Схема лицевой панели лабораторного макета

2.4. Программа работы

2.4.1. Исследование разделительной и дифференцирующей (укорачивающей) цепей

- 2.4.1.1. Установить на генераторе импульсов минимальное значение амплитуды выходных импульсов (ручку регулировки амплитуды «АМПЛ» в

крайнее левое положение). Подать на вход разделительной (укорачивающей) цепи (выделена синим цветом на лицевой панели) положительные прямоугольные импульсы с параметрами, соответствующими выданному варианту (см. Приложение 1). Амплитуду импульсов увеличивать плавно от минимального до необходимого значения, параметры подаваемых импульсов контролировать с помощью осциллографа.

- 2.4.1.2. Установить переключатель $SA1$ в положение выключено (вверх). С помощью осциллографа снять выходные импульсы для различных номиналов элементов схемы ($C2$, $R2$). Определить параметры ($C2$, $R2$), при которых исследуемая цепь выполняет функции разделительной.
- 2.4.1.3. Для разделительной цепи определить параметры, при которых величина спада плоской вершины импульса оказывается минимальной. Рассчитать в процентах минимальную величину спада плоской вершины импульса γ для выбранных параметров и сравнить с экспериментальными данными.
- 2.4.1.4. Установить переключатель $SA1$ в положение включено (вниз). Оценить влияние R_n на амплитуду и форму выходного импульса (для двух произвольных значений параметров $R2$, $C2$ разделительной цепи).
- 2.4.1.5. Установить переключатель $SA1$ в положение выключено (вверх). Определить параметры ($C2$, $R2$), при которых исследуемая цепь выполняет функции дифференцирующей (укорачивающей).
- 2.4.1.6. Определить двумя способами (расчетным и экспериментальным) длительность выходного импульса на уровне $0,5U_m$ и $0,05U_m$ для дифференцирующей (укорачивающей) цепи.
- 2.4.1.7. Установить переключатель $SA1$ в положение включено (вниз). Оценить влияние R_n на амплитуду и форму выходного импульса (для двух произвольных значений параметров $R2$, $C2$ дифференцирующей цепи).

2.4.2. Исследование интегрирующей цепи

- 2.4.2.1. Используя генератор импульсов, подать на вход интегрирующей цепи (выделена зеленым цветом на лицевой панели) положительные прямоугольные импульсы с параметрами, соответствующими выданному варианту (см. Приложение 1). Амплитуду импульсов увеличивать плавно от минимального до необходимого значения, параметры подаваемых импульсов контролировать с помощью осциллографа.
- 2.4.2.2. Установить переключатель $SA1$ в положение выключено (вверх). С помощью осциллографа снять выходные импульсы для различных номиналов элементов схемы ($C1$, $R1$). Оценить зависимость параметров

выходного импульса от соотношения между постоянной времени цепи τ и длительностью входного импульса.

- 2.4.2.3. Определить двумя способами (расчетным и экспериментальным) абсолютную погрешность интегрирования $\Delta U(t_{ивых})$. При определении экспериментально снимать выходной импульс с $R_{ш}$.
- 2.4.2.4. Установить переключатель $SA1$ в положение включено (вниз). Оценить влияние R_n на амплитуду и форму выходного импульса (для двух произвольных значений параметров $R1, C1$ интегрирующей цепи).

2.5. Контрольные вопросы

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

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

В чем заключается физическая сущность появления погрешности интегрирования?

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

2.6. Содержание отчета

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

3. ЭЛЕКТРОННЫЙ КЛЮЧ. Лабораторная работа №2

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

3.1. Основные теоретические сведения

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

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

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

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

3.1.1. Режимы работы транзистора

На Рис. 12, а приведен простейший вариант схемы каскада с общим эмиттером. Существуют три основных режима работы биполярного транзистора: активный (усилительный), насыщения и отсечки. Ключевой режим характеризуется состояниями отсечки (точка В — ключ разомкнут) и насыщения (точка А — ключ замкнут). В режиме отсечки (точка В) падение напряжения на транзисторе $U_{кэ}$ близко к напряжению источника питания. Токи I_k и $I_б$ при этом минимальны, одинаковые по величине и равны обратному току коллекторного перехода $I_{ко}$.

При увеличении положительного смещения на базе $U_{бэ}$ транзистор переходит в активный режим, а когда потенциал базы превысит потенциал коллектора — режим насыщения (точка А). В режиме насыщения ток коллектора определяется соотношением:

$$I_{кнас} = E_k / R_k \quad (3.1)$$

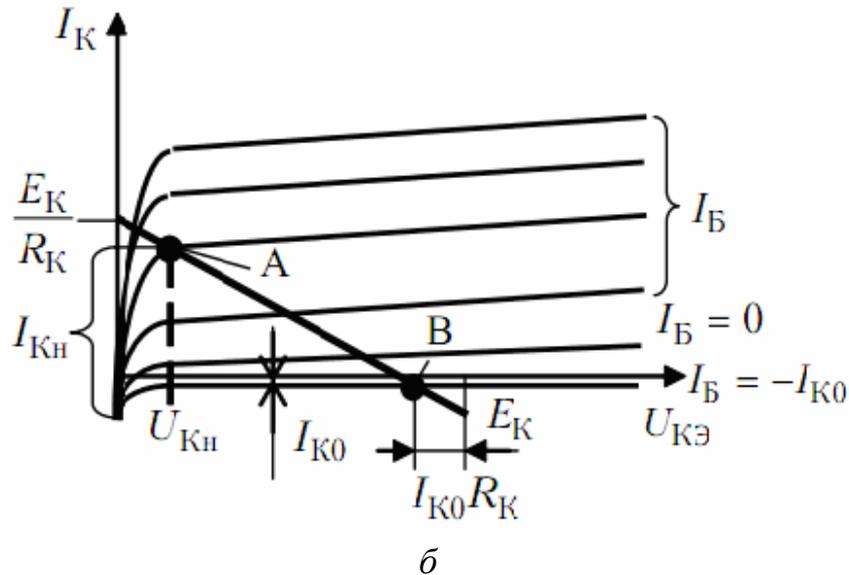
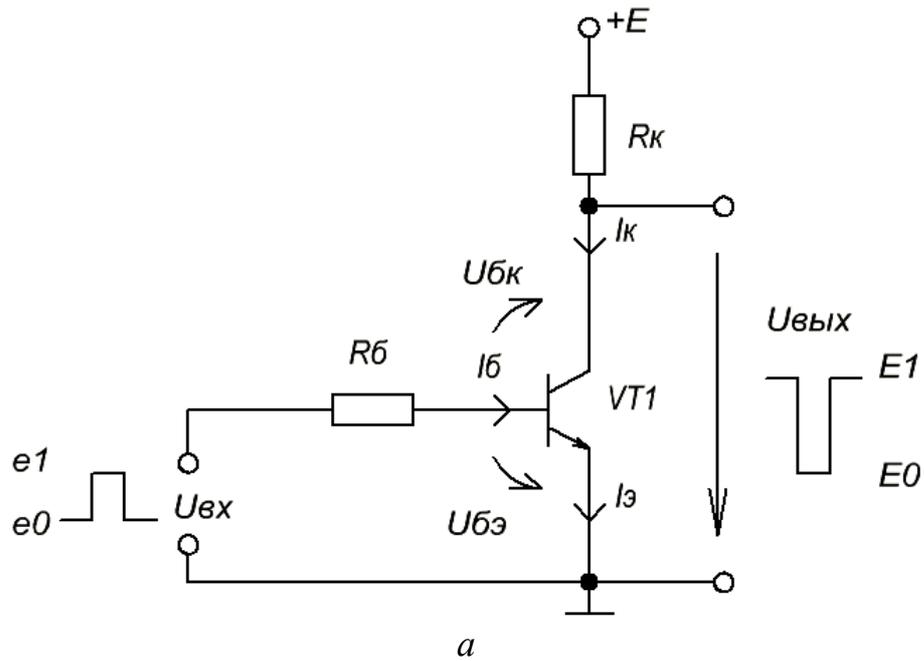


Рис. 12 Транзисторный ключ (а) и его вольт-амперная характеристика (б)

Если напряжение $U_{вх}$ увеличивать, то ток I_{β} в отличие от тока I_{κ} будет расти. Для переключения транзистора из режима отсечки (ключ разомкнут) в режим насыщения (ключ замкнут) необходимо обеспечить определенный ток базы I_{β} .

Минимальный ток базы, необходимый для перехода транзистора в режим насыщения обозначим $I_{\beta_{нас}}$, тогда условие насыщения транзистора имеет вид:

$$I_{\beta} \geq I_{\beta_{нас}}. \quad (3.2)$$

Ток базы ограничен резистором R_{β} и определяется соотношением:

$$I_{\bar{o}} = \frac{U_{BX} - U_{BЭ}}{R_{\bar{o}}}. \quad (3.3)$$

Соотношение между $I_{\bar{o}}$ и $I_{\bar{o}нас}$ называется коэффициентом (степенью) насыщения и определяется по формуле:

$$K_n = \frac{I_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}нас}}. \quad (3.4)$$

Таким образом, используя понятие коэффициента насыщения, приведем соотношение между $I_{\bar{o}}$ и I_{κ} :

$$I_{\bar{o}} = K_n \cdot \frac{I_{\kappa}}{\beta}, \quad (3.5)$$

где β — статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером.

3.1.2. Переходные процессы в транзисторном ключе

Важнейшим показателем работы электронных ключей является их быстродействие, которое оценивается скоростью протекания переходных процессов — процессов включения и выключения.

Мгновенное переключение транзисторного ключа невозможно из-за инерционных свойств транзистора, паразитных реактивностей элементов схемы и проводников.

На Рис. 13 приведены временные диаграммы: входного напряжения (*a*), напряжения на базе (*б*), тока коллектора (*в*) и напряжения на коллекторе (*г*) транзисторного ключа.

До момента t_1 напряжение на входе транзистора $E_{\bar{o}} = e_0 = 0$ поддерживает транзистор в режиме отсечки, при этом в базовой цепи протекает ток $I_{\bar{o}} = -I_{\kappa o}$, напряжение на коллекторе составляет $U_{\kappa} = E_{\kappa} - I_{\kappa o} \cdot R_{\kappa}$ (т.к. $I_{\kappa o} \cdot R_{\kappa} \rightarrow 0$, то $U_{\kappa} \approx E_{\kappa}$).

В момент времени t_1 напряжение $e_{\bar{o}}$ скачком изменяется до значения $E_{\bar{o}} = e_1$. Будем считать, что условие насыщения транзистора выполняется. Транзистор переходит в активный режим, и ток коллектора начинает экспоненциально нарастать с постоянной времени τ_{β} , происходит перезаряд входной емкости транзистора. Уровень коллекторного тока зависит от управляющего тока базы. Он равен $I_{\kappa нас}$ только в том случае, когда коэффициент насыщения $K_n \geq 1$ (Рис. 13, *в*).

Время фронта t_f будет тем меньше, чем больше будет K_H . При достижении коллекторным током значения $I_K = I_{K_{нас}}$ напряжение на коллекторе падает до $U_{K_{нас}} = E_K - I_{K_{нас}} \cdot R_K$.

В момент времени t_2 напряжение на базе падает до нуля $E_{\sigma} = e_0 = 0$, на интервале t_p происходит рассасывание заряда в базе. Время рассасывания t_p тем больше, чем выше коэффициент насыщения. На практике выбирают коэффициент насыщения в пределах $(1,5 \div 2)$. После процесса рассасывания транзистор вновь оказывается в активном режиме. Коллекторный ток уменьшается экспоненциально с постоянной времени τ_{β} до I_{K0} в течение интервала времени t_c .

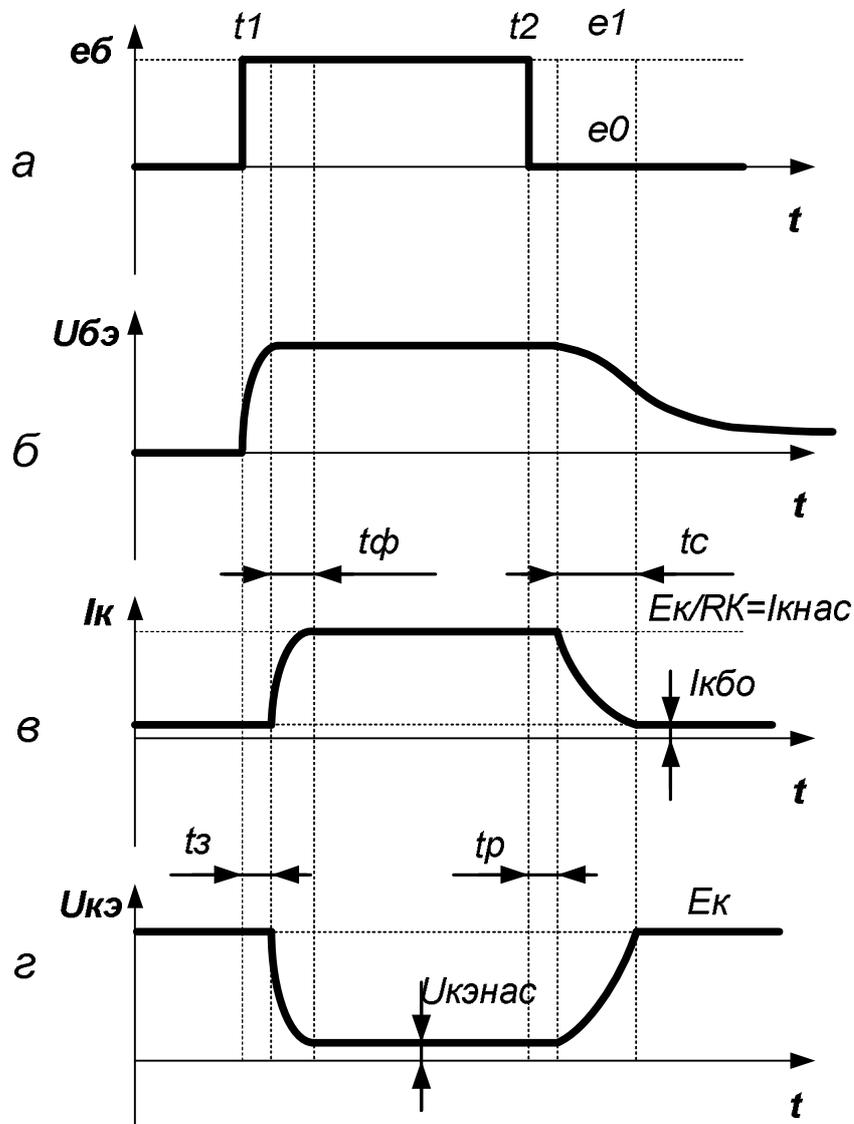


Рис. 13 Временные диаграммы: входного напряжения (а), напряжения на базе (б), тока коллектора (в) и напряжения на коллекторе (г) транзистора

Время включения ключа определяется задержкой включения t_3 и длительностью фронта t_ϕ . Задержка включения обусловлена перезарядом входной емкости C_{ex} . Время задержки включения определяется соотношением:

$$t_3 = C_{ex} \frac{|U_{\bar{\beta}3}| + U_{пор}}{I_{\bar{\beta}}}, \quad (3.6)$$

где $C_{ex} = C_{\bar{\beta}} + C_k$;

$C_{\bar{\beta}}$ — емкость эмиттерного перехода;

C_k — емкость коллекторного перехода;

$U_{\bar{\beta}3}$ — напряжение запираения на базе транзистора;

$U_{пор}$ — пороговое напряжение;

$I_{\bar{\beta}}$ — ток базы транзистора.

Фронт обусловлен инерционными процессами изменения концентрации носителей в базе и изменениями заряда барьерной емкости коллекторного перехода. Время фронта определяется соотношением:

$$t_\phi = \tau_{\beta экв} \ln \frac{I_{\bar{\beta}}}{I_{\bar{\beta}} - I_{\bar{\beta}н}}, \quad (3.7)$$

где $\tau_{\beta экв} = \tau_\beta + \beta \cdot R_k \cdot C_k$ — эквивалентная постоянная времени транзистора;

$\tau_\beta = \frac{\beta}{2\pi f_\beta}$ — постоянная времени, отображающая инерционность транзистора;

$f_\beta = \beta \cdot f_\alpha$ — связь граничной частоты в схеме с общим эмиттером (f_β) и в схеме с общей базой (f_α).

Время выключения ключа определяется временем рассасывания t_p и временем спада (среза) t_c .

Рассасывание сопровождается уменьшением тока коллектора от $\beta \cdot I_{\bar{\beta}}$ до $I_{кнас}$. Время рассасывания определяется по формуле:

$$t_p = \tau_{\beta экв} \ln K_n. \quad (3.8)$$

Срез обусловлен инерционным характером уменьшения заряда в базе. Транзистор переходит с границы насыщения в область отсечки. При этом время спада определяется по формуле:

$$t_c = 3 \cdot \tau_{\beta экв}. \quad (3.9)$$

3.1.3. Транзисторный ключ с повышенным быстродействием

Для повышения быстродействия транзисторных ключей часто применяют форсирующую емкость и диод (Рис. 14).

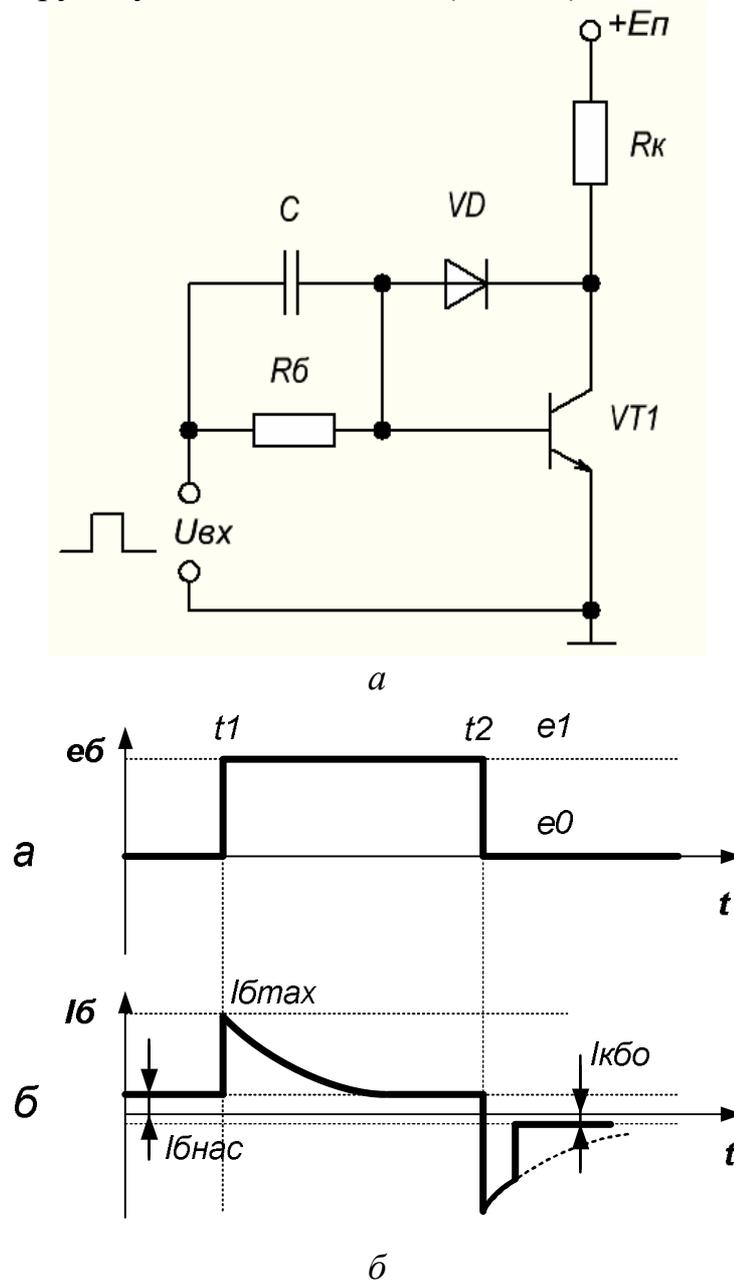


Рис. 14 Переходные процессы в транзисторном ключе с форсирующей емкостью

В начальный момент времени конденсатор разряжен (см. Рис. 14, б). В момент времени t_1 напряжение изменяется скачком от $e_0 = 0$ до e_1 , при этом базовый ток протекает через конденсатор и достигает значения $I_{бmax}$. По мере заряда конденсатора базовый ток уменьшается экспоненциально до значения $I_{бнас} = \frac{U_{вх} - U_{бэ}}{R_{б}}$. В момент времени t_2 напряжение падает до

$e_0 = 0$ и происходит выключение транзистора повышенным базовым током, за счет напряжения U_c , до которого заряжен конденсатор. Таким образом, форсирующая емкость C уменьшает время включения и выключения ключа за счет увеличения тока включения и выключения.

Для ограничения степени насыщения служит диод VD , вводимый в базно-коллекторную цепь транзисторного ключа. Если открытый транзистор приближается к режиму насыщения, то напряжение на его коллекторе становится весьма малым, диод открывается, и часть тока ответвляется в коллекторную цепь. Базовый ток не достигает больших значений, транзистор не заходит в режим глубокого насыщения, и в области базы не создается высокая концентрация носителей зарядов.

3.2. Методика проведения измерений

Для проведения измерений используется осциллограф, основные органы управления которого приведены на Рис. 6.

3.2.1. Рекомендуемая последовательность действий при снятии временных характеристик

- 3.2.1.1. Обеспечить питание лабораторного макета, в соответствии с программой работы подать на вход схемы прямоугольные импульсы и установить необходимые параметры элементов схемы.
- 3.2.1.2. Подключить один из каналов осциллографа ко входу макета, второй — к выходу. Установить на каждом из каналов режим DC (Рис. 6 – 2) и выбрать двухканальный режим DUAL MODE (Рис. 6 – 3).
- 3.2.1.3. Перевести осциллограф в режим внешней синхронизации с генератором импульсов (соединить вывод генератора «Синхроимпульсы» с выводом осциллографа «EXT TRIG» и перевести соответствующий тумблер в положение EXT, как показано на Рис. 6 – 1).
- 3.2.1.4. Добиться максимально развернутого и четкого изображения на экране осциллографа. При этом нужно использовать регуляторы Volt/DIV для каждого канала, развертку по времени TIME/DIV, а также TRIG LEVEL, FOCUS, INTENSITY.
- 3.2.1.5. Если осциллограф имеет регулятор VAR SWEEP установить его в крайнее правое положение, как показано на Рис. 6 – 4.
- 3.2.1.6. Провести измерения, руководствуясь данными на Рис. 15 (при измерениях рекомендуется растянуть сигнал по оси времени как можно больше).

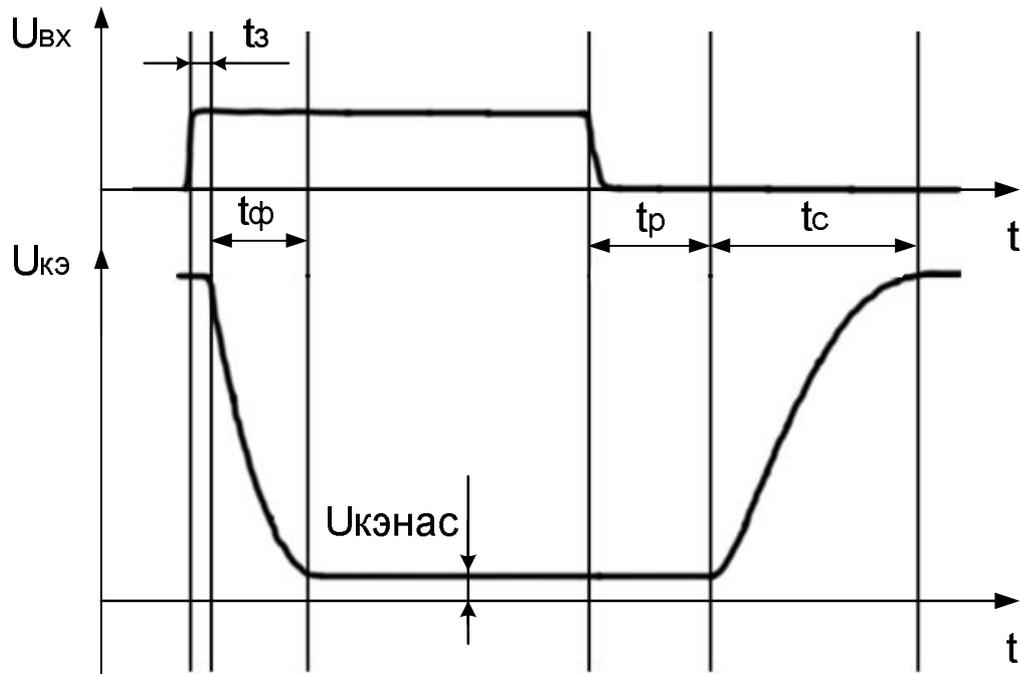


Рис. 15 Временная характеристика транзисторного ключа

3.2.2. Методика определения коэффициента усиления по току (β транзистора)

- 3.2.2.1 Установить переключатель номиналов базового резистора R_B в положение 4, коллекторного резистора R_K в положение 3, при этом транзистор работает в активном режиме.
- 3.2.2.2 Плавно увеличивая длительность входных импульсов (более 5 мкс) добиться окончания переходного процесса.
- 3.2.2.3 В установившемся режиме измерить с помощью осциллографа $U_{КЭ}$, U_{BX} , $U_{БЭ}$. Для определения $U_{КЭ}$ использовать Рис. 15.
- 3.2.2.4 Рассчитать коэффициент усиления по току, используя формулы:

$$I_B = \frac{U_{BX} - U_{БЭ}}{R_B}; \quad (3.10)$$

$$I_K = \frac{E_{II} - U_{КЭ}}{R_K}; \quad (3.11)$$

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}. \quad (3.12)$$

3.3. Описание лабораторного макета

Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на Рис. 16.

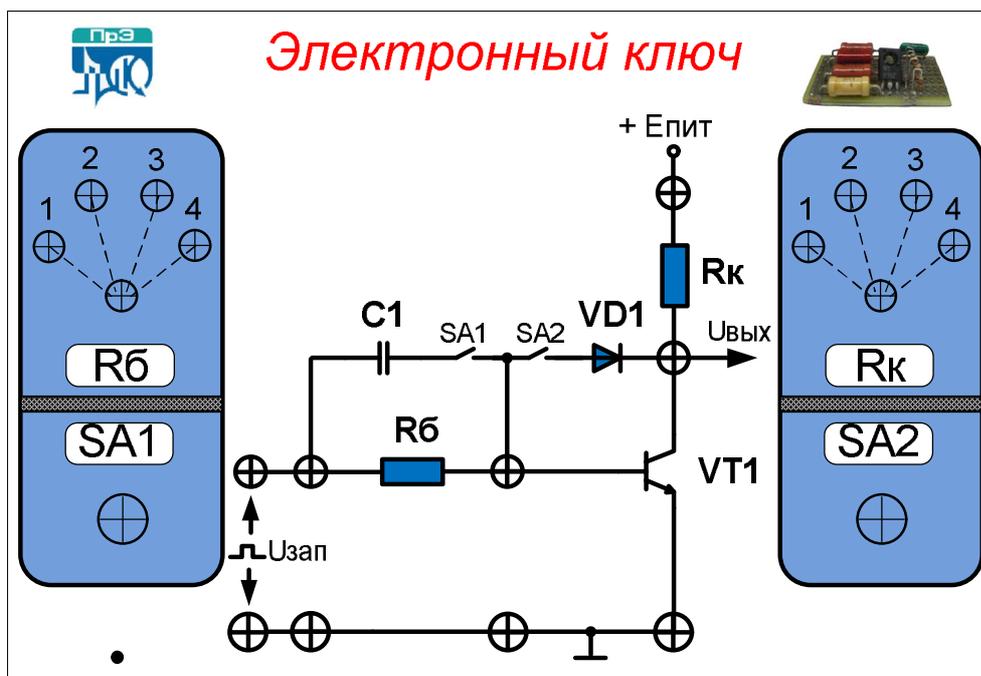


Рис. 16 Схема лицевой панели лабораторного макета

Лабораторный макет «Электронный ключ» выполнен в отдельном корпусе. На лицевой панели лабораторного макета представлена схема электронного ключа, два 4-х позиционных переключателя, а также два переключателя $SA1$ и $SA2$. Для переключателей $SA1$ и $SA2$ положение ВВЕРХ — ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО.

В качестве основного элемента схемы используется биполярный транзистор — КТ815Г (параметры транзистора приведены в таблицах, см. Приложение 2). Питание макета осуществляется от стабилизированного источника 30 В с регулировкой напряжения, встроенного в приборную панель лабораторного стола.

Два 4-х позиционных переключателя позволяют подключить необходимые номиналы базового $R_б$ и коллекторного $R_к$ резисторов. С помощью переключателей $SA1$ и $SA2$ можно подключать форсирующую емкость $C1$ и диод $VD1$ соответственно.

Номиналы элементов схемы приведены в таблицах, см. Приложение 2.

3.4. Программа работы

- 3.4.1. Подключить лабораторный макет к источнику напряжения 30В, встроенному в приборную панель лабораторного стола. Установить напряжение питания в соответствии с вариантом (приложение 1). Установить переключатели $SA1$ и $SA2$ в положение выключено (ВВЕРХ). Установить на генераторе импульсов минимальное значение амплитуды выходных импульсов (ручку регулировки амплитуды «АМПЛ» в крайнее левое положение). Подать на вход схемы положительные прямоугольные импульсы амплитудой в соответствии с вариантом, частотой 30 кГц, длительностью

5мкс. Амплитуду входных импульсов увеличивать плавно от минимального до необходимого значения, НЕ ДОПУСКАТЬ УВЕЛИЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ВЫШЕ 10 В, параметры подаваемых импульсов контролировать с помощью осциллографа.

- 3.4.2. С помощью двух 4-х позиционных переключателей установить активный режим работы транзистора (подключить резисторы $R_{\beta 4}$ и $R_{\beta 3}$). Используя осциллограф и п. 3.2.2 «Методика определения коэффициента усиления по току», определить коэффициент усиления по току.
- 3.4.3. С помощью осциллографа определить время задержки t_z , время фронта t_f , время рассасывания t_p , время спада t_c , напряжение насыщения $U_{кэ_{нас}}$ выходного импульса для трех произвольных значений базового (R_{β}) и коллекторного (R_k) резисторов. Транзистор должен находиться в режиме насыщения ($K_n > 1$).
- 3.4.4. Повторить измерения для одного из случаев, подключив с помощью ключа $SA1$ (установить в положение «ВНИЗ») ускоряющую емкость $C1$. Оценить влияние ускоряющей емкости (сопоставляя форму выходного импульса при разомкнутом и замкнутом положениях ключа $SA1$).
- 3.4.5. Повторить измерения для одного из случаев, подключив с помощью ключа $SA2$ (установить в положение «ВНИЗ») диод $VD1$. Оценить влияние диода (сопоставляя форму выходного импульса при разомкнутом и замкнутом положениях ключа $SA2$).
- 3.4.6. Одновременно подключить ускоряющую емкость $C1$ и диод $VD1$. Оценить их совместное влияние (сопоставляя форму выходного импульса при разомкнутом и замкнутом положениях ключей $SA1$ и $SA2$).
- 3.4.7. Используя данные таблиц (см. Приложение 2), рассчитать временные параметры транзистора и сравнить их с экспериментальными данными.
- 3.4.8. Сделать вывод о зависимости временных параметров от степени насыщения транзистора (степень насыщения изменяется при изменении базового R_{β} и коллекторного R_k резисторов) а также от использования ускоряющей емкости $C1$ и диода $VD1$.

3.5. Контрольные вопросы

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

Какие параметры определяют быстродействие транзисторного ключа?

Как связаны между собой степень насыщения транзистора и время фронта t_f ?

Как связаны между собой степень насыщения транзистора и время рассасывания t_p ?

Объясните влияние ускоряющей емкости на быстродействие транзисторного ключа?

Объясните влияние диода в базно-коллекторной цепи на быстродействие транзисторного ключа?

3.6. Содержание отчета

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

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЖДУЩЕГО МУЛЬТИВИБРАТОРА И ТРИГГЕРА ШМИДТА. Лабораторная работа №3

4.1. Основные теоретические сведения

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

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

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

4.1.1. Триггер Шмидта

Идеализированная передаточная характеристика триггера представляет собой прямоугольную петлю гистерезиса (Рис. 17, *a*) с пороговыми уровнями напряжения ε_0 и ε_1 , при которых происходит переключение триггера из одного устойчивого состояния в другое. Такой характеристикой обладает и триггер Шмидта.

Гистерезис увеличивает стабильность работы триггера при напряжениях близких к пороговому. В отсутствие гистерезиса при входных напряжениях, близких к порогу срабатывания любая помеха на входе вызовет многократное переключение триггера, что обычно крайне нежелательно.

Реальные передаточные характеристики триггера Шмидта отличаются в большей или меньшей мере от прямоугольной петли — в зависимости от используемых элементов и схемотехники триггера, а также влияния различных дестабилизирующих факторов.

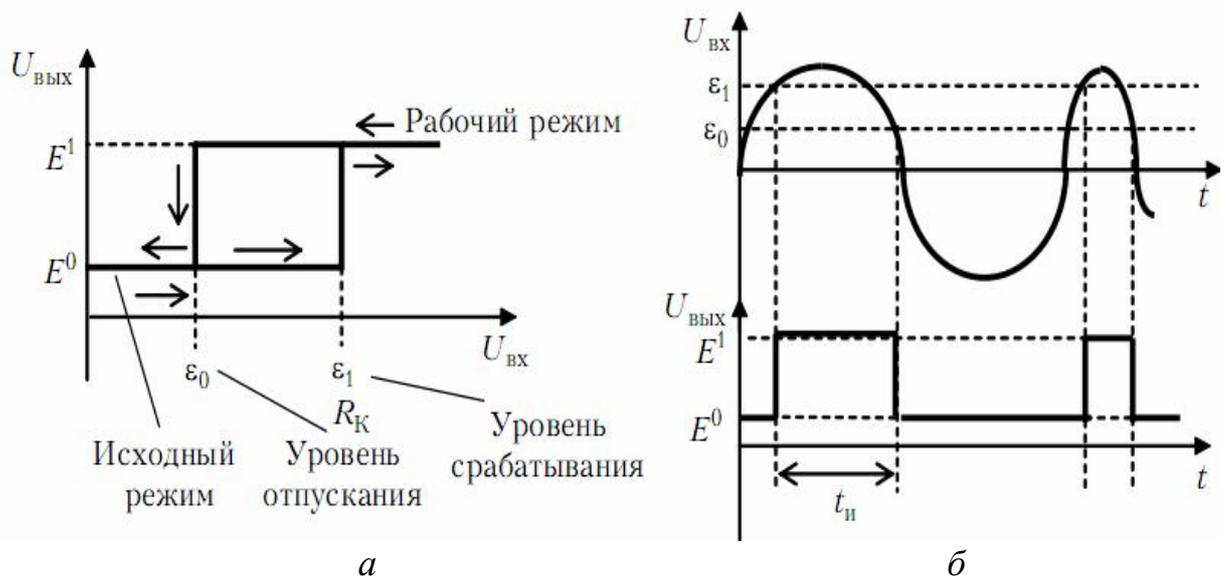


Рис. 17. Передаточная характеристика несимметричного триггера (а) и соответствующие ей временные диаграммы (б)

Если выходное напряжение $U_{\text{вых}} = E^0$ (исходный режим триггера), то при увеличении входного напряжения выходное напряжение сохраняется на уровне E^0 до тех пор, пока $U_{\text{вх}} < \varepsilon_1$. При достижении входным напряжением порогового уровня срабатывания ε_1 ($U_{\text{вх}} = \varepsilon_1$) происходит весьма быстрое скачкообразное переключение триггера в рабочий режим, в котором $U_{\text{вых}} = E^1$, при дальнейшем росте $U_{\text{вх}}$ состояние триггера не изменяется, и сохраняется высокий уровень E^1 выходного напряжения.

При уменьшении $U_{\text{вх}}$ рабочий режим триггера сохраняется до тех пор, пока $U_{\text{вх}} > \varepsilon_0$. При достижении входным напряжением порогового уровня отпуская ε_0 ($U_{\text{вх}} = \varepsilon_0$) происходит скачкообразное переключение триггера в исходное состояние, и при $U_{\text{вх}} < \varepsilon_0$ состояние триггера не изменяется. Пороговые уровни ε_0 и ε_1 (и ширина петли гистерезиса $\Delta U_{\text{вх}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_0$) являются основными параметрами триггера Шмидта. Понятно, что длительность переключения (срабатывания) триггера всегда конечна и зависит от свойств используемых компонентов. Формирование импульсов триггером Шмидта иллюстрируется на Рис. 17, б.

Изменение пороговых уровней ε_0 и ε_1 , а также введение смещения входного напряжения позволяют регулировать длительность формируемых импульсов и использовать триггер Шмидта в качестве сравнивающего устройства с управляемыми пороговыми уровнями.

Обязательное условие нормального функционирования триггера Шмидта $\varepsilon_0 < \varepsilon_1$.

Схема замещения триггера Шмидта – триггера с эмиттерной связью – приведена на Рис. 18.

Триггер с эмиттерной связью имеет два устойчивых состояния: в одном транзистор $VT1$ заперт, транзистор $VT2$ насыщен, в другом — наоборот. Переход триггера из одного состояния в другое осуществляется скачком каждый раз, когда управляющее напряжение $U_{ex}(t)$ достигает пороговых уровней ε_0 и ε_1 . Если, например, в исходном состоянии $VT1$ заперт, $VT2$ насыщен, то при $U_{ex} = \varepsilon_1$ транзистор $VT1$ отпирается, восстанавливается петля положительной обратной связи и возникает регенеративный лавинообразный процесс, который завершается запираем транзистора $VT2$.

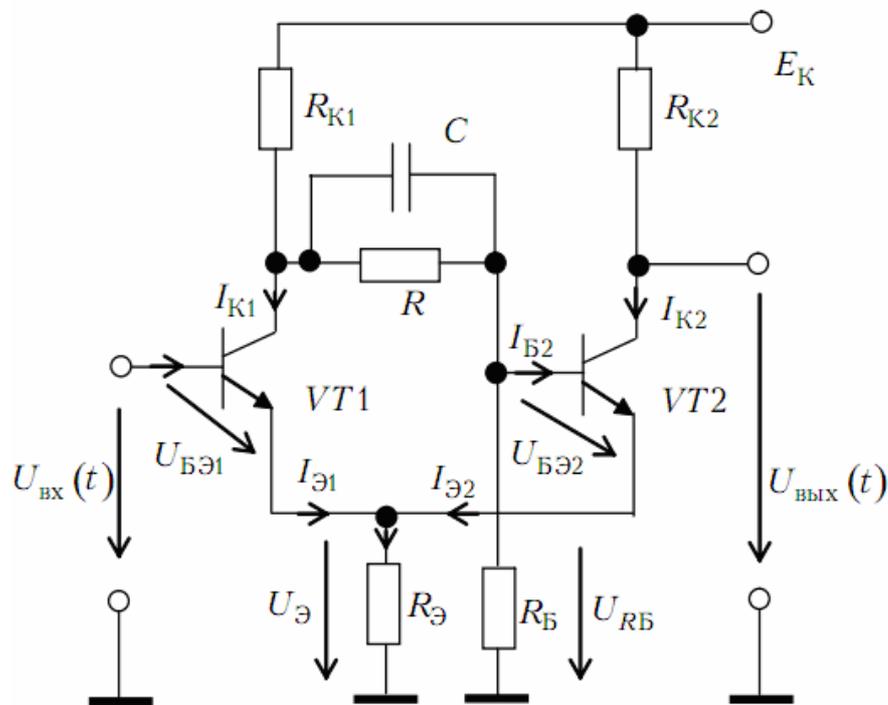


Рис. 18. Триггер Шмидта на дискретных компонентах

Через резистор $R_Э$ осуществляется не только положительная обратная связь $VT2$ с $VT1$, но и отрицательная обратная связь по току в каскаде транзистора $VT1$. Однако в процессе опрокидывания определяющей является положительная обратная связь. Действительно, в процессе опрокидывания, когда оба транзистора открыты, ток $I_Э$ в резисторе $R_Э$ равен сумме токов $I_{Э1}$ и $I_{Э2}$ транзисторов $VT1$ и $VT2$, и изменение напряжения на резисторе $R_Э$: $\Delta U_Э = R_Э(\Delta I_{Э1} + \Delta I_{Э2})$. Но $\Delta I_{Э1} > 0$ (ток $I_{Э1}$ растет), $\Delta I_{Э2} < 0$ (ток $I_{Э2}$ падает) и $|\Delta I_{Э2}| \gg \Delta I_{Э1}$, так как $VT1$ работает в усилительном режиме с коэффициентом усиления по току, много

большим единицы; поэтому результирующее напряжение $\Delta U_{\mathcal{E}} < 0$, то есть положительная обратная связь $VT2$ с $VT1$ является преобладающей.

4.1.2. Ждущий мультивибратор

Ждущий мультивибратор (Рис. 19) или одновибратор представляет собой устройство, вырабатывающее один нормированный по амплитуде, длительности и форме импульс напряжения при каждом воздействии на мультивибратор запускающего импульса.

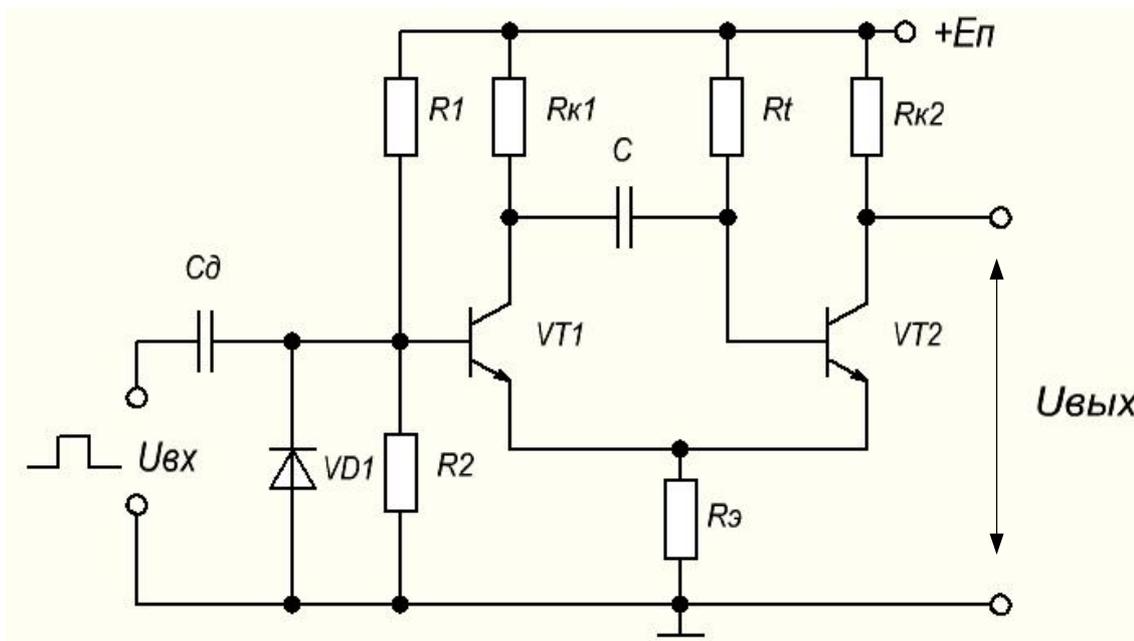


Рис. 19. Ждущий мультивибратор

В исходном состоянии устойчивого равновесия транзистор $VT1$ заперт, $VT2$ насыщен. Состояние $VT2$ обеспечивается резистором R_t с сопротивлением $R_t < \beta R_{k2}$, через который протекает базовый ток, достаточный для насыщения $VT2$.

В эмиттерной цепи протекает ток эмиттера $I_{\mathcal{E}} \approx E_k / (R_{k2} + R_{\mathcal{E}})$, за счет которого на резисторе $R_{\mathcal{E}}$ возникает падение напряжения $U_{\mathcal{E}} = I_{\mathcal{E}} R_{\mathcal{E}}$. Одновременно через делитель $R1 - R2$ протекает ток, создавая на резисторе $R2$ падение напряжения U_{R2} . Если $|U_{\mathcal{E}}| > |U_{R2}|$, то обеспечивается запертое состояние транзистора $VT1$.

Конденсатор C в исходном состоянии заряжен до напряжения $U_C = E_k - U_{\mathcal{E}}$ по цепи $E_k - R_{k1} - C - R_{\mathcal{E}}$. Напряжение на конденсаторе C не может влиять на состояние открытого транзистора $VT2$ из-за большого сопротивления $r_{k\mathcal{E}}$ закрытого транзистора $VT1$.

При поступлении запускающего сигнала (см. Рис. 20) происходит опрокидывание схемы, в результате которого $VT1$ начинает открываться, и напряжение на его коллекторе уменьшается. Отрицательный перепад напряжения с него через конденсатор C передается в базу транзистора $VT2$, запирая его и уменьшая ток эмиттера от отпираания $VT1$ меньше, чем уменьшение от запираания $VT2$, так как $R_{K1} > R_{K2}$.

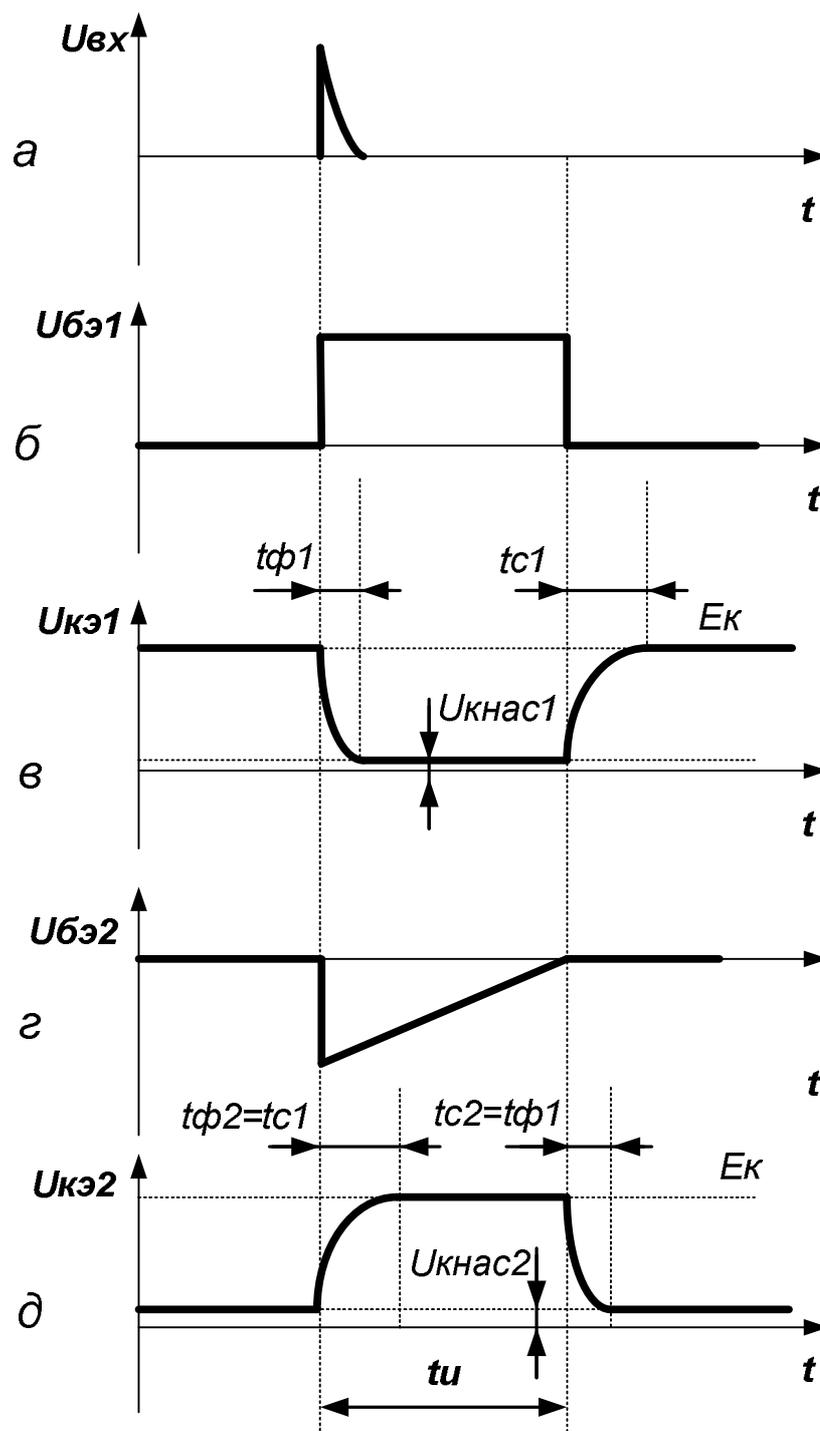


Рис. 20. Временные диаграммы работы ждущего мультивибратора

В результате на резисторе R_3 положительное напряжение уменьшается, что эквивалентно его увеличению на базе $VT1$, который еще больше открывается, и т.д. Этот лавинообразный процесс заканчивается запирающим $VT2$ и насыщением $VT1$. Транзистор $VT2$ удерживается в запертом состоянии отрицательным напряжением на конденсаторе, который через насыщенный транзистор $VT1$ подключен к базе $VT2$.

Приведем формулу для расчета длительности сформированного импульса:

$$t_H \approx 0,7CR_t. \quad (4.1)$$

Время восстановления схемы определяется временем заряда конденсатора C :

$$t_{вос} \approx (4 \div 5)C(R_{к1} + R_3) \leq T - t_u, \quad (4.2)$$

где T — период запускающих импульсов.

4.2. Методика проведения измерений

Для проведения измерений порогов срабатывания и отпускания используется вольтметр и осциллограф.

4.2.1. Определение порогов срабатывания и отпускания триггера Шмидта

- 4.2.1.1. Обеспечить питание лабораторного макета.
- 4.2.1.2. Установить необходимые номиналы элементов схемы и положения переключателей.
- 4.2.1.3. Подключить осциллограф к выходу схемы.
- 4.2.1.4 Подключить вольтметр к базе транзистора $VT1$.
- 4.2.1.5. Изменяя величину $R2$ соответствующим регулятором, контролировать напряжение на базе транзистора $VT1$ вольтметром и выходное напряжение осциллографом. Зафиксировать показания вольтметра, при которых транзистор $VT2$ открывается и закрывается (наблюдать на осциллографе). Напряжение, при котором транзистор $VT2$ открывается — порог срабатывания, при котором закрывается — порог отпускания.

4.2.2. Рекомендуемая последовательность действий при снятии временных характеристик

- 4.2.2.1. Обеспечить питание лабораторного макета, в соответствии с программой работы подать на вход схемы прямоугольные импульсы и установить необходимые параметры элементов схемы.
- 4.2.2.2. Подключить один из каналов осциллографа ко входу, второй — к выходу. Установить на каждом из каналов режим DC и выбрать двухканальный режим DUAL MODE.
- 4.2.2.3. Перевести осциллограф в режим внешней синхронизации с генератором импульсов (соединить вывод генератора «Синхроимпульсы» с выводом осциллографа «EXT TRIG» и перевести соответствующий тумблер в положение EXT).
- 4.2.2.4. Добиться максимально развернутого и четкого изображения на экране осциллографа. При этом нужно использовать регуляторы Volt/DIV для каждого канала, развертку по времени TIME/DIV, а также TRIG LEVEL, FOCUS, INTENSITY.
- 4.2.2.5. Если осциллограф имеет регулятор VAR SWEEP установить его в крайнее правое положение. Провести измерения, руководствуясь данными на Рис. 21 (при измерениях рекомендуется растянуть сигнал по оси времени как можно больше).

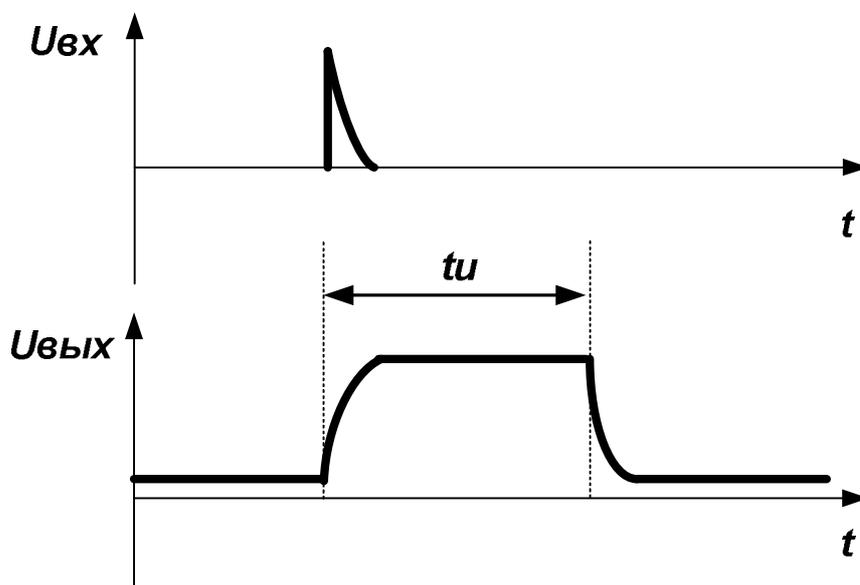


Рис. 21. Определение длительности выходного импульса

4.3. Описание лабораторного макета

Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на рис. 4.1.

Лабораторный макет «Ждущий мультивибратор и Триггер Шмидта» выполнен в отдельном корпусе. На лицевой панели лабораторного макета представлена обобщенная схема ждущего мультивибратора и триггера

Шмидта, три 4-х позиционных переключателя, а также три переключателя S_{A1} , S_{A2} , S_{A3} . Для переключателей S_{A1} , S_{A2} , S_{A3} положение ВВЕРХ — ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО. Питание макета осуществляется от стабилизированного источника 30 В с регулировкой напряжения, встроенного в приборную панель лабораторного стола.

4-х позиционные переключатели позволяют подключить необходимые номиналы элементов $R_э$, C , R_t . С помощью переключателей S_{A1} и S_{A2} можно выбирать одну из приведенных схем, переключатель S_{A3} позволяет подключать нагрузку R_n к выходу схемы.

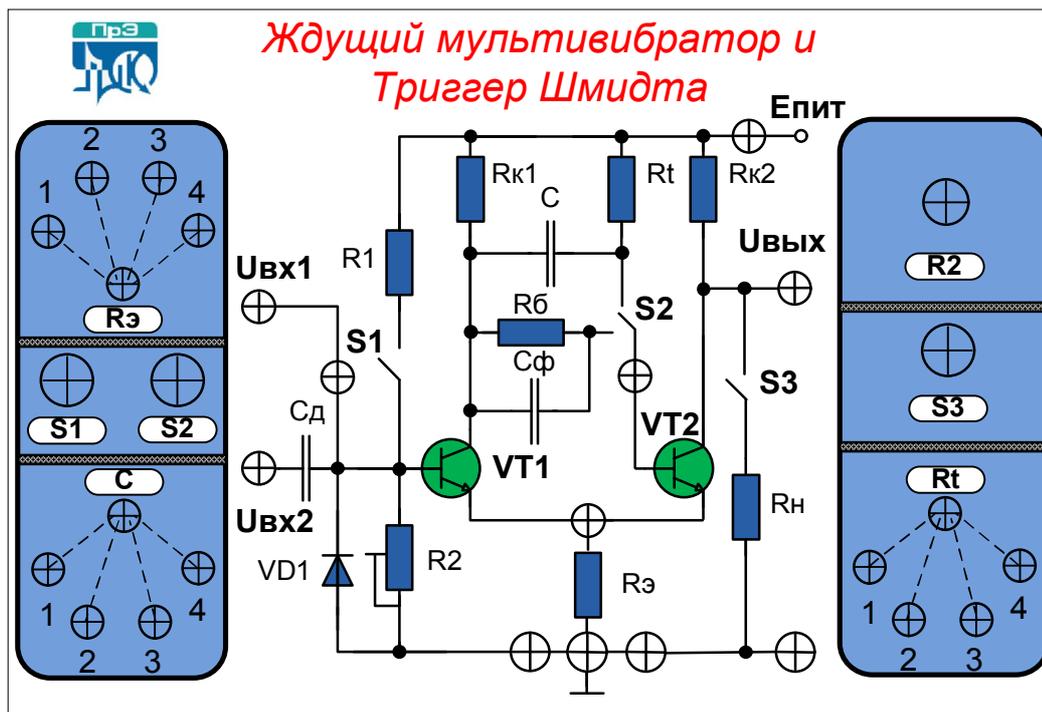


Рис. 22. Схема лицевой панели лабораторного макета

Номиналы элементов схемы содержит Приложение 3.

4.4. Программа работы

4.4.1. Исследование триггера Шмидта

- 4.4.1.1. Собрать схему триггера Шмидта (S_1 разомкнут (ВВЕРХ), S_2 подключен к $R_б$ и $C_ф$ (ВНИЗ), S_3 разомкнут (ВВЕРХ)). Подключить лабораторный макет к источнику питания и установить напряжение питания E_n в соответствии с вариантом (Приложение 3).
- 4.4.1.2. Замкнуть тумблер S_1 (ВНИЗ). Установить переключатель $R_э$ в положение 1. Измерить пороги срабатывания и отпускания триггера (п. 4.2.1 «*Определение порогов срабатывания и отпускания триггера Шмидта*»).

- 4.4.1.3. Повторить измерения п. 4.4.1.2 для всех положений переключателя $R_э$. Установить зависимость между величиной $R_э$ и порогами срабатывания и отпускания триггера.
- 4.4.1.4. Подключить нагрузку к выходу триггера – замкнуть тумблер S_3 (ВНИЗ). Повторить измерения п. 4.4.1.2 для двух произвольных значений $R_э$.
- 4.4.1.5. Разомкнуть тумблер S_1 (ВВЕРХ). Подключить низкочастотный генератор сигналов ГЗ/112 ко входу триггера $U_{вх1}$, перед включением установить на генераторе ручку регулировки амплитуды в крайнее левое положение (минимальное). Подать на вход $U_{вх1}$ синусоидальное напряжение, амплитуду и частоту задать в соответствии с приложением 1. Установить ручку потенциометра R_2 в крайнее правое положение (максимум).
- 4.4.1.6. Снять осциллограммы напряжений $U_{вх1}$, $U_{вых}$ в едином временном масштабе. Изменяя величину сопротивлений R_2 и $R_э$, наблюдать изменение выходного напряжения. Объяснить происходящие изменения.

4.4.2. Исследование ждущего мультивибратора

- 4.4.2.1. Собрать схему ждущего мультивибратора (S_1 замкнут (ВНИЗ), S_2 подключен к R_1 (ВВЕРХ), S_3 разомкнут (ВВЕРХ)).
- 4.4.2.2. Подать на вход $U_{вх2}$ схемы положительные прямоугольные импульсы амплитудой 10 В, частотой $f = 10$ кГц, длительностью 50 мкс.
- 4.4.2.3. Изменяя величину сопротивления R_2 соответствующим регулятором, добиться напряжения $U_{вых}$ прямоугольной формы с максимально возможной длительностью.
- 4.4.2.4. Снять осциллограммы напряжений $U_{вх2}$, $U_{вых}$ в едином временном масштабе. Измерить длительность формируемого импульса.
- 4.4.2.5. Повторить измерения п. 4.4.2.4 для различных значений Rt и C .
- 4.4.2.6. Построить зависимости: $t_u = f(Rt)$ при $C = const$ и $t_u = f(C)$ при $Rt = const$. Рассчитать длительности импульса для всех комбинаций значений Rt и C , используя Приложение 3, и сравнить полученные данные с экспериментальными.
- 4.4.2.7. Контролируя длительность выходного импульса, увеличивать частоту запускающих импульсов до тех пор, пока длительность выходного импульса не начнет уменьшаться. В этот момент с помощью осциллографа измерить время восстановления:

$$t_{вос} = T - t_u,$$

где T — период запускающих импульсов, t_u — длительность запускающих импульсов.

- 4.4.2.8. Произвольно изменить величину конденсатора C , повторить измерение времени восстановления. Рассчитать время восстановления и сравнить полученные данные с экспериментальными.
- 4.4.2.9. Подключить нагрузку R_n с помощью ключа S_3 (ВНИЗ), оценить влияние R_n на параметры выходного сигнала.

4.5. Контрольные вопросы

Чем определяется длительность формируемого импульса для ждущего мультивибратора?

Для чего используется триггер Шмидта?

Как можно изменить порог срабатывания и отпускания триггера Шмидта?

В чем заключается явление гистерезиса?

Чем определяется время восстановления для схемы ждущего мультивибратора?

4.6. Содержание отчета

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

5. ГЕНЕРАТОР ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ. Лабораторная работа №4

Целью работы является:

1. Исследование работы простейшего ГЛИН.
 - Исследование зависимости выходного напряжения и коэффициента нелинейности пилообразного напряжения K_n от величины зарядного резистора.
 - Исследование зависимости выходного напряжения и K_n от периода запускающих импульсов.
 - Исследование зависимости длительности обратного хода от величины базового резистора.
2. Исследование ГЛИН со стабилизатором тока.
 - Исследование зависимости выходного напряжения от величины резисторов базового делителя.
 - Исследование зависимости выходного напряжения от величины эмиттерного резистора.
3. Исследование ГЛИН с компенсирующей ЭДС.
 - Исследование зависимости выходного напряжения и K_n от величины зарядного резистора.
 - Исследование зависимости выходного напряжения от величины зарядного конденсатора.

5.1. Основные теоретические сведения

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

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

Если в соотношении, описывающем процесс заряда конденсатора, заменить $I_{зар}(t)$ на $I_{зар} = const$, то видно, что напряжение на конденсаторе линейно зависит от времени:

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_{зар}(t) dt = \frac{I_{зар}}{C} t. \quad (5.1)$$

При постоянстве зарядного тока напряжение на конденсаторе возрастает линейно и с него можно снять пилообразное напряжение. При идеальном зарядном токе ($I_{зар} = const$) коэффициент нелинейности выходного напряжения $K_n = 0$. Это идеализированный случай, здесь не учтены сопротивления утечки элементов схемы и сопротивления нагрузки.

Главным параметром оценки качества генераторов пилообразного напряжения является коэффициент нелинейности пилообразного напряжения K_H . Он характеризует изменение скорости нарастания напряжения за все время рабочего хода и его можно определить по формуле:

$$K_H = \frac{V_{нач} - V_{кон}}{V_{нач}}, \quad (5.2)$$

где $V_{нач}$ — скорость изменения U_c в начале формирования пилообразного напряжения;

$V_{кон}$ — скорость изменения U_c в конце формирования пилообразного напряжения.

Так как скорость изменения напряжения зависит от величины тока заряда конденсатора, а при снятии сигнала с шунта $R_{ш}$ форма напряжения повторяет форму тока заряда конденсатора, то коэффициент нелинейности пилообразного напряжения можно определить как:

$$K_H = \frac{I_{нач} - I_{кон}}{I_{нач}} = \frac{U_{нач} - U_{кон}}{U_{нач}}, \quad (5.3)$$

где $I_{нач}$ и $I_{кон}$ — начальный и конечный токи заряда конденсатора;

$U_{нач}$ и $U_{кон}$ — начальное и конечное напряжения на $R_{ш}$, повторяющие форму тока заряда конденсатора.

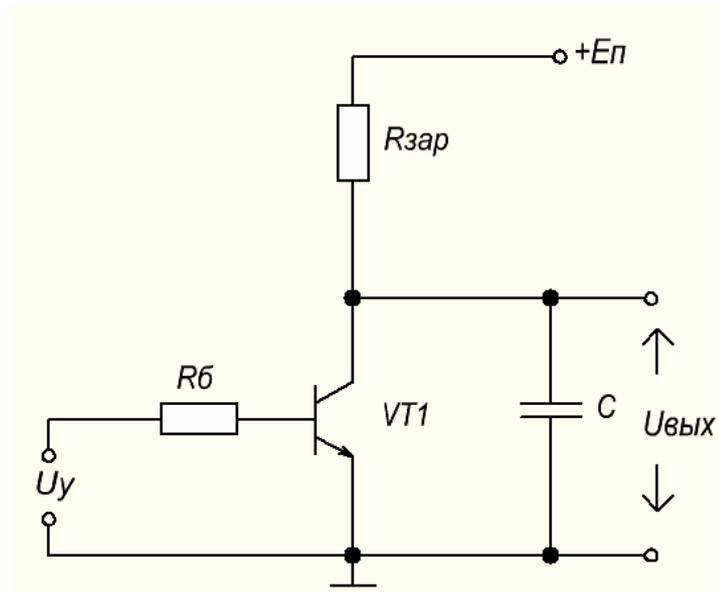
5.2. Простейший ГЛИН

Простейшая схема генератора линейно изменяющегося напряжения приведена на Рис. 23, а. Линейно изменяющееся напряжение образуется при заряде конденсатора C через резистор $R_{зар}$ от источника E_n . Транзистор $VT1$, работающий в ключевом режиме, переключает конденсатор с заряда на разряд.

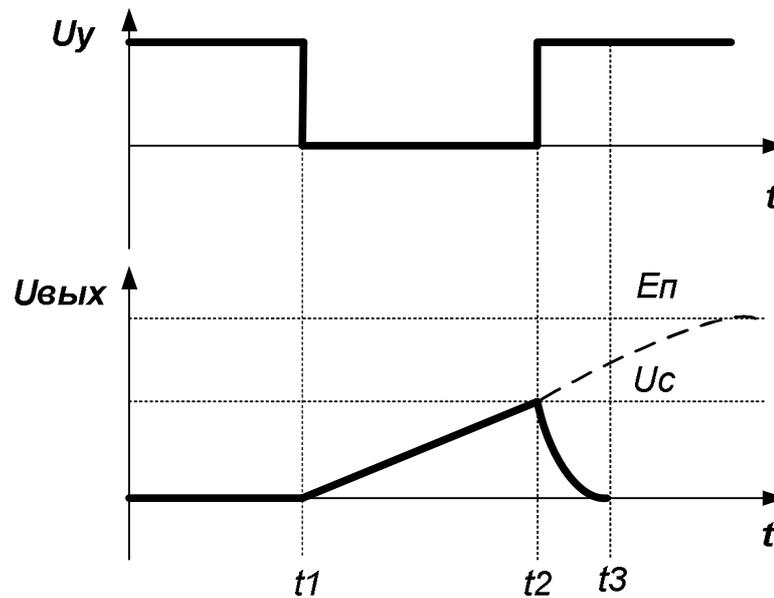
В исходном состоянии до момента t_1 транзистор открыт напряжением управления (см. Рис. 23, б), величина базового тока, обусловленная резистором R_b , обеспечивает его насыщенное состояние. Конденсатор C разряжен до напряжения коллектор — эмиттерного перехода транзистора. Начиная с момента t_1 транзистор закрывается, и начинается заряд конденсатора по цепи $E_n, R_{зар}, C$ с постоянной времени $\tau_{зар} = R_{зар} C$.

В этом случае выходная цепь генератора представляет собой интегрирующую цепь, в которой напряжение источника E_n является входным. Напряжение на выходе такой цепи меняется по экспоненциальному закону, стремясь к E_n . Подаваемое в момент времени t_2 отпирающее напряжение открывает транзистор и прерывает процесс нарастания напряжения на конденсаторе. Величина тока заряда конденсатора в начальный момент времени определяется как $I_{нач} = E_{II} / R_k$, а в конце заряда — как

$I_{кон} = (E_{II} - U_C) / R_k$. Из этих выражений видно, что, чем больше амплитуда выходного сигнала, тем меньше значение тока в конце заряда и больше коэффициент нелинейности.



а



б

Рис. 23. Генератор линейно нарастающего напряжения (а) и его временные диаграммы (б)

Выходное напряжение изменяется по закону:

$$U_{вых}(t) = U_C(t) = E_{II} \left(1 - e^{-t/\tau_{зар}} \right). \quad (5.4)$$

Если интервал времени между отпирающими импульсами мал по отношению к $\tau_{зар}$ ($t_{зар} = t_2 - t_1 \ll \tau_{зар}$), в промежутках между входными

импульсами на выходе генератора формируется линейно нарастающее напряжение:

$$U_{\text{вых}}(t) = E_{\Pi} \frac{t_{\text{зар}}}{\tau_{\text{зар}}}. \quad (5.5)$$

Экспоненциально нарастающее напряжение на заряжаемом конденсаторе близко к линейному, если время нарастания много меньше постоянной времени $\tau_{\text{зар}}$.

Коэффициент нелинейности в простейшем ГЛИН можно уменьшить, увеличивая $\tau_{\text{зар}}$ или уменьшая $t_{\text{зар}}$. Объясняется это тем, что в обоих случаях уменьшается длительность используемого участка экспоненты, а чем меньше используемый участок, тем он ближе к линейной характеристике.

Процесс разряда конденсатора является подготовительным для начала следующего цикла формирования пилообразного напряжения. Приход на базу транзистора отпирающего сигнала переводит транзистор в режим пропорциональной передачи тока, так как величина тока разряда конденсатора определяется только параметрами самого транзистора:

$$I_{VT} = \frac{U_y}{R_{\beta}} \beta. \quad (5.6)$$

Тогда время разряда можно определить как:

$$t_{\text{разр}} = \frac{U_C \cdot C}{I_{\text{разр}}}, \quad (5.7)$$

где $I_{\text{разр}} = I_{VT} - I_K$.

После выхода транзистора в режим насыщения напряжение на конденсаторе можно считать равным нулю и схему готовой к новому циклу работы.

Линейно нарастающее напряжение характеризуется следующими параметрами:

$t_{\text{ПР.Х}} = t_{\text{зар}} = t_2 - t_1$ — длительность прямого хода (время, в течение которого происходит заряд конденсатора);

$t_{\text{О.Х}} = t_{\text{разр}} = t_3 - t_2$ — длительность обратного хода (время восстановления — время, в течение которого происходит разряд конденсатора C);

$T = t_{\text{ПР.Х}} + t_{\text{О.Х}}$ — длительность пилообразных импульсов;

U_{max} — амплитуда пилообразных импульсов;

$K_{\text{И.П}}$ — коэффициент использования напряжения источника питания, который показывает, насколько амплитуда пилообразного напряжения U_{max} меньше амплитуды, до которой мог бы зарядиться конденсатор:

$$K_{И.П} = \frac{U_{\max}}{E_{П}}. \quad (5.8)$$

5.2.1. ГЛИН со стабилизатором тока

Заряжая или разряжая конденсатор током, не меняющимся в процессе заряда, можно обеспечить абсолютное линейное изменение напряжения на нем даже при больших уровнях выходного сигнала. Этот принцип формирования линейного закона изменения напряжения реализуется в генераторе линейно изменяющегося напряжения со стабилизатором тока (Рис. 24).

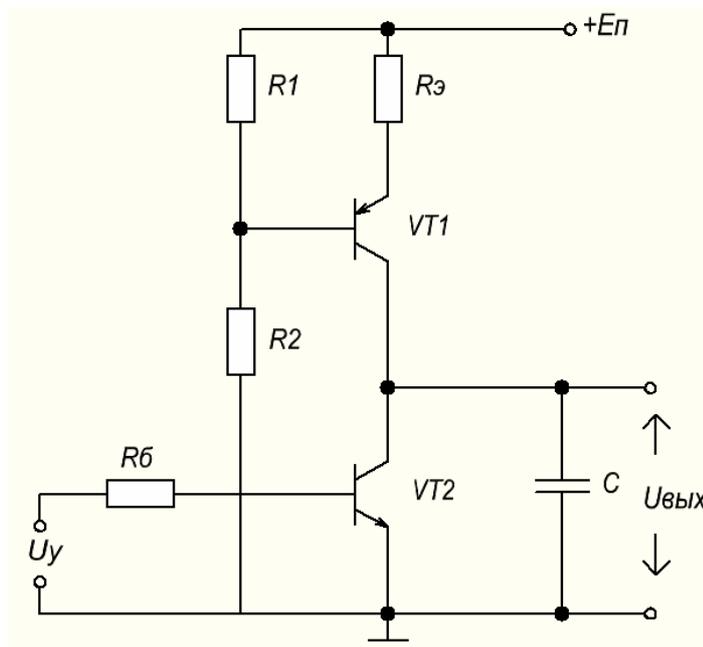


Рис. 24. Генератор линейно нарастающего напряжения со стабилизатором тока

В исходном состоянии конденсатор C заряжен. При подаче входного сигнала транзистор $VT2$ открывается, конденсатор C разряжается. При уровне входного сигнала $U_y = 0$ транзистор $VT2$ закрывается, конденсатор C заряжается через стабилизатор тока на транзисторе $VT1$. При этом обеспечивается постоянство тока заряда, а выходное напряжение изменяется по линейному закону.

5.2.2. ГЛИН с компенсирующей ЭДС

Для получения линейного закона изменения напряжения также используется принцип линеаризации. Принцип линеаризации напряжения на

конденсаторе путем включения дополнительного источника компенсирующей ЭДС в цепь заряда рассмотрим на Рис. 25, а.

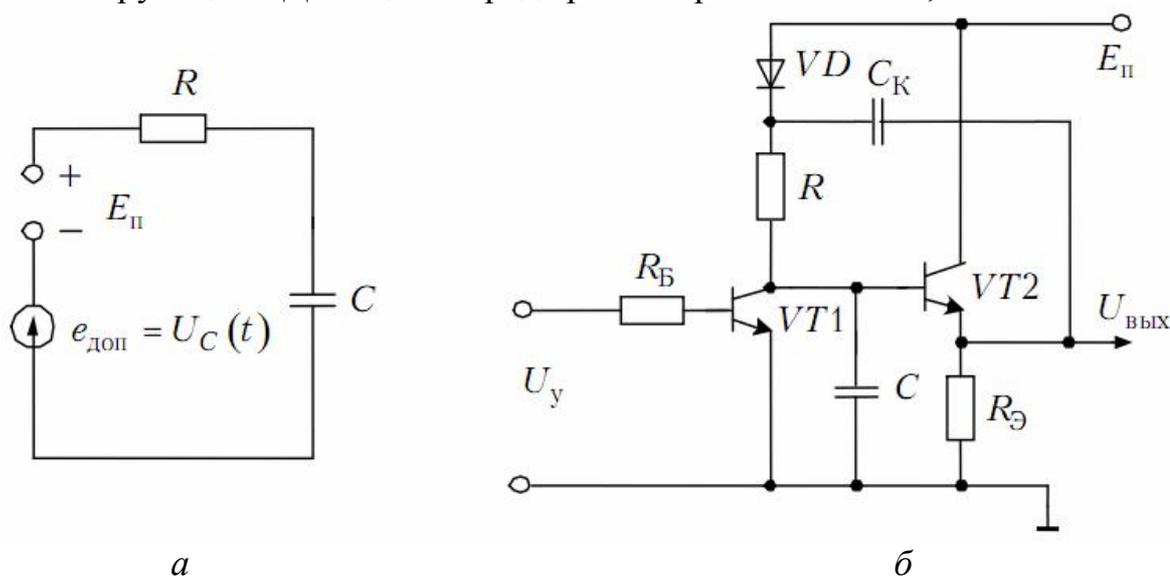


Рис. 25. Генератор линейно нарастающего напряжения с компенсирующей ЭДС: а – включение компенсирующей ЭДС; б – принципиальная схема

На интегрирующую цепь действует сумма двух напряжений E_{Π} и дополнительного изменяющегося напряжения $e_{\text{доп}}$. Процесс заряда конденсатора начинается при действии напряжения E_{Π} . При $t = 0$ зарядный ток $I_C = \frac{E_{\Pi} + e_{\text{доп}} - U_C}{R} = \frac{E_{\Pi}}{R}$, так как $e_{\text{доп}} = 0$, $U_C = U_{C0} = 0$. По мере заряда напряжение на конденсаторе возрастает, и ток I_C должен уменьшаться. Однако суммарное зарядное напряжение равно $E_{\Pi} + e_{\text{доп}}$ и рост $e_{\text{доп}}$ компенсирует уменьшение зарядного тока. В том случае, когда $e_{\text{доп}} = U_C$, ЭДС $e_{\text{доп}}$ полностью компенсирует изменение зарядного тока I_C , т.е. достигается условие $I_C = \text{const}$.

На практике часто в качестве источника дополнительного напряжения используют конденсатор большой емкости C_K . За время формирования прямого хода $t_{\text{ПР.Х}}$ напряжение на таком конденсаторе не успевает существенно измениться и может считаться постоянным.

Принципиальная схема генератора, в котором используется рассмотренный принцип линеаризации выходного напряжения, показана на Рис. 25, б. Транзистор $VT1$ работает в ключевом режиме, $VT2$ — в режиме эмиттерного повторителя. Выход эмиттерного повторителя является выходом источника напряжения компенсирующей ЭДС и одновременно выходом всей схемы.

При подаче управляющего сигнала U_y транзистор $VT1$ насыщен. В цепи его базы от источника входного сигнала протекает отпирающий ток $I_{\delta} = \frac{U_y}{R_{\delta}}$. Ток коллектора этого транзистора протекает через диод VD и резистор R от источника питания E_{Π} , величина которого равна $I_K = \frac{E_{\Pi}}{R}$. Напряжение на выходе эмиттерного повторителя при этом равно нулю, а напряжение на конденсаторе C_K равно напряжению питания.

При напряжении $U_{\delta} = 0$ транзистор $VT1$ закрывается, и начинается заряд конденсатора C . По мере заряда конденсатора, на выходе повторителя появляется напряжение, которое суммируется с напряжением на конденсаторе C_K , и это суммарное напряжение прикладывается к точке соединения диода VD и резистора R , при этом диод запирается, тем самым не давая разрядиться конденсатору на источник питания. В это же время суммарное напряжение, воздействуя на формирующую RC -цепь, обеспечивает постоянный по величине ток заряда конденсатора, и, следовательно, линейный закон роста на нем напряжения. Подачей на вход схемы сигнала отпирающей полярности будет прерван процесс заряда и начнется разряд конденсатора. Время разряда определяется параметрами ключа, такими как β , R_B , U_y , и параметрами RC -цепи при известных значениях E_{Π} и U_{\max} .

5.3. Методика проведения измерений

Измерения проводятся с помощью осциллографа. При этом необходимо добиться четкого и максимально развернутого сигнала на экране осциллографа.

5.3.1. Методика измерения коэффициента нелинейности выходного напряжения

Методика измерения основана на исследовании формы тока заряда конденсатора $C_{зар}$. Напряжение, пропорциональное току заряда, снимается с резистора $R_{ш}$, величина которого достаточно мала и не влияет на работу схемы.

Для проведения измерений необходимо:

- установить все параметры схемы согласно программе работы;
- подключить осциллограф к резистору $R_{ш}$;
- добиться четкого и максимально развернутого сигнала на экране осциллографа;

- провести измерения начального и конечного напряжений, используя график на Рис. 26;
- определить коэффициент нелинейности, используя формулу:

$$K_n = \frac{U_{нач} - U_{кон}}{U_{нач}}$$

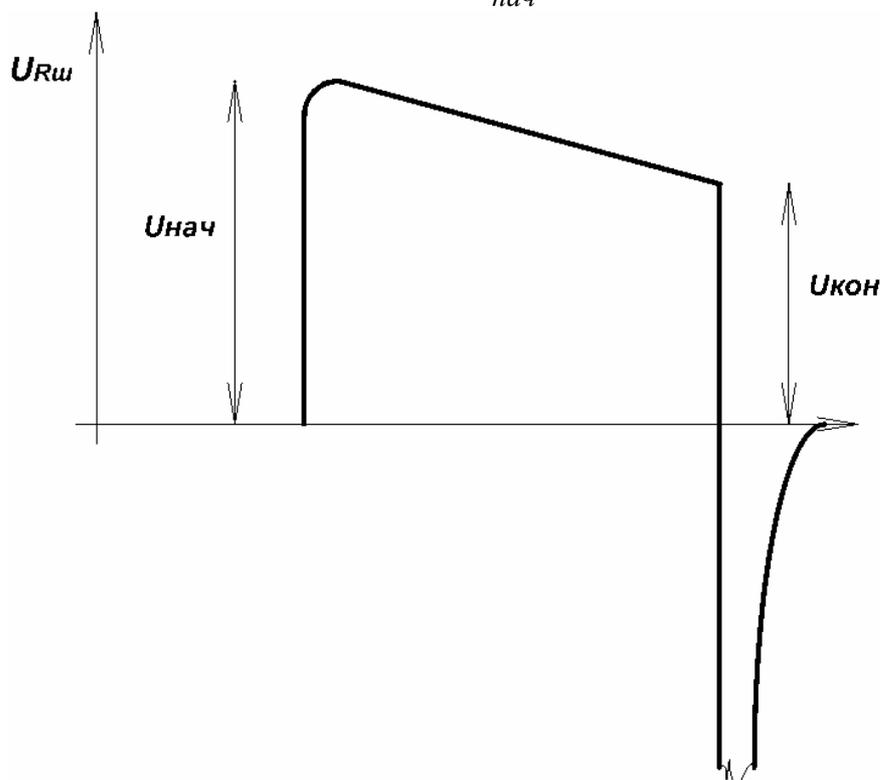


Рис. 26. Определение коэффициента нелинейности выходного напряжения

5.4. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет выполнен в виде отдельного блока, питание которого осуществляется от внешнего источника питания.

Схема лицевой панели лабораторного макета приведена на Рис. 27.

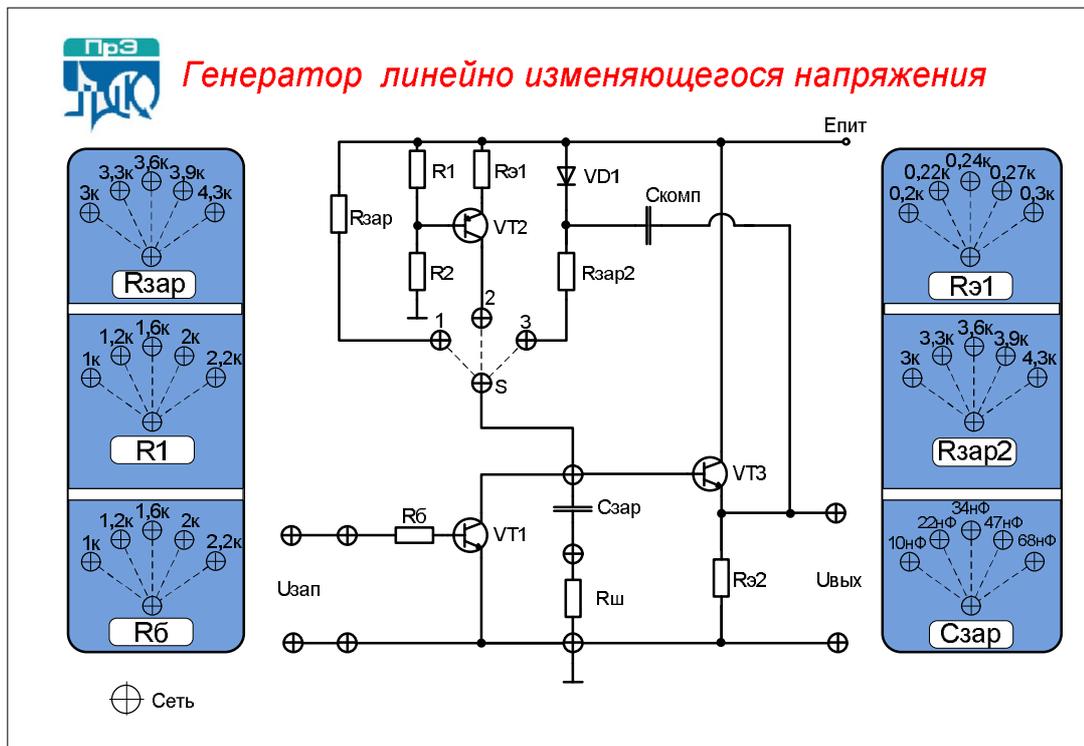


Рис. 27. Схема лицевой панели лабораторного макета

Назначение элементов управления:

Штекер S позволяет устанавливать необходимую схему ГЛИН:

- 1 — простейший генератор пилообразного напряжения;
- 2 — генератор со стабилизатором тока на биполярном транзисторе;
- 3 — генератор с компенсирующей ЭДС.

Переключение штекеров в соответствующие гнезда позволяет устанавливать номиналы $R_б$, $R_{зар}$, R_1 и других элементов схемы в соответствии с таблицей в приложении 1.

5.5. Программа работы

- 5.5.1. Подключить лабораторный макет к источнику напряжения 30 В, встроенному в приборную панель лабораторного стола. Установить напряжение питания в соответствии с вариантом (Приложение 4). Установить на генераторе импульсов минимальное значение амплитуды выходных импульсов (ручку регулировки амплитуды «АМПЛ» в крайнее левое положение). Подать на вход схемы положительные прямоугольные импульсы амплитудой в соответствии с вариантом, частотой 20 кГц, длительностью 5 мкс. Амплитуду входных импульсов увеличивать плавно от минимального до необходимого значения, **НЕ ДОПУСКАТЬ УВЕЛИЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ВЫШЕ 5 В**, параметры подаваемых импульсов контролировать с помощью осциллографа.

- 5.5.2. Подать на вход схемы прямоугольные запускающие импульсы частотой 20 кГц, длительностью 5 мкс, амплитудой 1.5 В (амплитуду импульсов контролировать осциллографом).
- 5.5.3. **Установить S в положение 1.** Установить переключатели $R_{зар}$ и $C_{зар}$ в соответствии с вариантом (Приложение 4, номер варианта задается преподавателем), положение переключателя R_6 произвольное.
- 5.5.4. Снять осциллограммы напряжений $U_{зан}$, $U_{вых}$ в едином временном масштабе, построить друг под другом, измерить амплитуду выходного напряжения и длительность обратного хода. Измерить коэффициент нелинейности пилообразного напряжения (см. методику проведения измерений). Сравнить полученные результаты с расчетными.
- 5.5.5. Произвольно изменить величину резистора $R_{зар}$. Повторить измерения п. 5.5.3.
- 5.5.6. Изменить период запускающих импульсов на 50 %. Повторить измерения п.5.5.3.
- 5.5.7. Установить $C_{зар} = 10$ нФ. Замерить длительность обратного хода при двух номиналах резистора R_6 (произвольно).
- 5.5.8. **Установить S в положение 2.** Установить номиналы R_1 и R_3 в соответствии с вариантом (Приложение 4).
- 5.5.9. Снять осциллограммы напряжений $U_{зан}$, $U_{вых}$ в едином временном масштабе, построить друг под другом, измерить амплитуду выходного напряжения. Измерить коэффициент нелинейности пилообразного напряжения.
- 5.5.10. Произвольно изменить величину резистора R_1 . Повторить измерения п. 5.5.8.
- 5.5.11. Произвольно изменить величину резистора R_3 . Повторить измерения п. 5.5.8.
- 5.5.12. **Установить S в положение 3.** Установить номиналы $R_{зар2}$ и $C_{зар}$ в соответствии с вариантом (Приложение 4).
- 5.5.13. Измерить амплитуду выходного напряжения. Измерить коэффициент нелинейности пилообразного напряжения (см. методику проведения измерений).
- 5.5.14. Произвольно изменить величину резистора $R_{зар2}$. Измерить амплитуду выходного напряжения.
- 5.5.15. Произвольно изменить величину конденсатора $C_{зар}$. Измерить амплитуду выходного напряжения.

5.6. Контрольные вопросы

Какой принцип используется для получения линейно изменяющегося напряжения?

Какими параметрами характеризуется линейно изменяющееся напряжение?

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

5.7. Содержание отчета

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

Список литературы

1. Герасимов В. М., Скворцов В. А. Электронные цепи и микросхемотехника. Схемотехника ключевых устройств формирования и преобразования сигналов : Учебное пособие / Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники. - Томск : ТУСУР, 2007. - 208 с. : ил., табл. - Библиогр.: с. 207-208. - 189.10 р. (наличие в библиотеке ТУСУР - 92 экз.)
2. Учебное пособие «Микросхемотехника. Аналоговая микросхемотехника» [Электронный ресурс] : для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н. С., Четвергов К. В. - 2014. 238 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/4289>, свободный.
3. Цифровые устройства и микропроцессорные системы : Учебник для средних специальных учебных заведений связи / Б. А. Калабеков. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Горячая линия-Телеком, 2007. - 336 с. : ил., табл. - (Учебник. Специальность для техникумов). - Библиогр.: с. 334. - ISBN 5-93517-008-6 (наличие в библиотеке ТУСУР - 135 экз.)
4. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебное пособие для вузов / В. Н. Павлов. - М. : Академия, 2008. - 287, [1] с. : ил., табл. - (Высшее профессиональное образование. Радиотехника) (Учебное пособие). - Библиогр.: с. 284. - ISBN 978-5-7695-2702-9 (наличие в библиотеке ТУСУР - 26 экз.)
5. Микросхемотехника и наноэлектроника [Текст] : учебное пособие для вузов / А. Н. Игнатов. - СПб. : Лань, 2011. - 528 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 515-522. - ISBN 978-5-8114-1161-0 (наличие в библиотеке ТУСУР - 4 экз.)
6. Электронные цепи и микросхемотехника : Учебник для вузов / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. - М. : Высшая школа, 2002. - 384 с. : ил. - Библиогр.: с. 382. - ISBN 5-06-004040-2 (в пер.) (наличие в библиотеке ТУСУР - 101 экз.)
7. Основные схемотехнические структуры цифровой интегральной микроэлектроники: Презентация / Легостаев Н. С. - 2015. 27 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/5585>, свободный.
8. Классификация интегральных микросхем. Система обозначений интегральных микросхем: Презентация / Легостаев Н. С. - 2015. 30 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/5579>, свободный.
9. Искусство схемотехники [Текст] : монография / П. Хоровиц, У. Хилл. - 7-е изд. - М. : БИНОМ, 2014. - 704 с. : табл., рис. - Пер. с англ. - ISBN 978-5-9518-0351-1 (наличие в библиотеке ТУСУР - 1 экз.)
10. Легостаев Н.С. Микросхемотехника. Руководство к организации самостоятельной работы для студентов специальности 210104.65 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» / Н.С. Легостаев,

К.В.Четвергов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 46 с. [Электронный ресурс]. - <http://www.ie.tusur.ru/docs/lms/mst.zip>

11. Башкиров В. Н., Орлов А. А. Лабораторный практикум по дисциплине «Микросхемотехника» для студентов специальности 210104.65 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» [Электронный ресурс]. - http://ie.tusur.ru/docs/lms/l_mst.rar

12. Микросхемотехника. Цифровая микросхемотехника : учебно-методическое пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов ; ред. П. Е. Троян ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2007. - 123[1] с. : ил., табл. - (Приоритетные национальные проекты. Образование). - Библиогр.: с. 6-7. - ISBN 978-5-86889-450-3 : 48.53 р. (наличие в библиотеке ТУСУР - 98 экз.)

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

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

Приложение 1
(к Лабораторной работе №1)

Параметры входных импульсов

Вариант	Амплитуда, В	Частота, кГц	Длительность, мкс
1	5	2	100
2	6	2	200
3	7	1	250
4	8	1	400
5	9	3	100
6	10	3	100
7	8	2	100
8	7	2	200
9	6	1	250
10	5	3	100

Номиналы элементов схемы

Обозначение на схеме	Положение переключателя	Сопротивление, Ом
<i>R1</i>	1	3,3 к
	2	10 к
	3	22к
	4	33к
<i>R2</i>	1	560
	2	1,5 к
	3	2,2 к
	4	3,3 к
Обозначение на схеме	Положение переключателя	Емкость, нФ
<i>C1</i>	1	10
	2	100
	3	470
	4	1000
<i>C2</i>	1	10
	2	100
	3	470
	4	1000

$R_{ш} = 27 \text{ Ом.}$

$R_{н1} = 5 \text{ кОм (для интегрирующей цепи).}$

$R_{н2} = 1,5 \text{ кОм (для разделительной/дифференцирующей цепи).}$

Параметры транзистора КТ815Г

1. Пороговое напряжение открывания транзистора $U_{пор}$ не более 0,6 В.
2. Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером не менее 30.
3. Граничная частота f_{α} не менее 3 МГц.
4. Емкость коллекторного перехода 60 пФ.
5. Емкость эмиттерного перехода 75 пФ.

Номиналы элементов схемы

Обозначение на схеме	Положение переключателя	Сопротивление, Ом
R_{σ}	1	4,7 к
	2	8,1 к
	3	10 к
	4	43 к
R_{κ}	1	360
	2	470
	3	680
	4	5100

Положение переключателей и параметры входных импульсов

Вариант	Амплитуда входного импульса, В	Напряжение источника питания, В
1	5	15
2	6	16
3	7	17
4	8	18
5	8	19
6	7	19
7	6	18
8	5	17
9	5	16
10	6	15

Приложение 3
(к Лабораторной работе №3)

**Соответствие параметров цепи необходимому варианту
для схемы Триггера Шмидта**

Вариант	$U_{вх}, В$	$f, кГц$	$E_n, В$
1	6	10	15
2	7	20	16
3	8	30	17
4	8	40	18
5	7	50	19
6	7	60	18
7	6	80	17
8	6	100	16
9	5	80	14
10	5	60	13

Номиналы элементов схемы

	Положение переключателей			
	1	2	3	4
$R_э, Ом$	330	430	560	680
$C, пФ$	150	330	390	560
$R_t, кОм$	200	240	270	330

$R_{к1} = 27 кОм, R_H = 10 кОм.$

Приложение 4
(к Лабораторной работе №4)

**Соответствие положения переключателей
необходимому варианту**

Вариант	Положение переключателей					
	R_{δ}	$R_{зар}$	$R_{зар2}$	R_1	R_3	$C_{зар}$
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5
6	1	3	2	4	2	3
7	2	4	3	5	3	4
8	3	5	4	1	4	5
9	4	1	5	2	5	1
10	5	2	1	3	1	2

Номиналы элементов схемы

	Положение переключателей				
	1	2	3	4	5
R_{δ} , кОм	1	1,2	1,6	2	2,2
$R_{зар}$, кОм	3	3,3	3,6	3,9	4,3
$R_{зар2}$, кОм	3	3,3	3,6	3,9	4,3
R_1 , кОм	1	1,2	1,6	2	2,2
R_3 , Ом	200	220	240	270	300
$C_{зар}$, нФ	10	20	30	40	68

$$R_{и} = 51 \text{ Ом}; \quad R_2 = 10 \text{ кОм.}$$