

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

<b>СОДЕРЖАНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА.....</b>	<b>4</b>
1.1. Источник питания.....	4
1.2. Генератор импульсов.....	5
1.3. Осциллограф.....	7
<b>2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЮЩИЕ ЦЕПИ.</b>	
<b>Лабораторная работа №1 .....</b>	<b>9</b>
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
<b>3. ЭЛЕКТРОННЫЙ КЛЮЧ. Лабораторная работа №2.....</b>	<b>18</b>
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
<b>4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЖДУЩЕГО МУЛЬТИВИБРАТОРА И ТРИГГЕРА ШМИДТА.</b>	
<b>Лабораторная работа №3 .....</b>	<b>29</b>
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
<b>5. ГЕНЕРАТОР ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ. Лабораторная</b>	
<b>    <b>работа №4.....</b></b>	<b>39</b>
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
<b>Список литературы.....</b>	<b>50</b>

## 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.

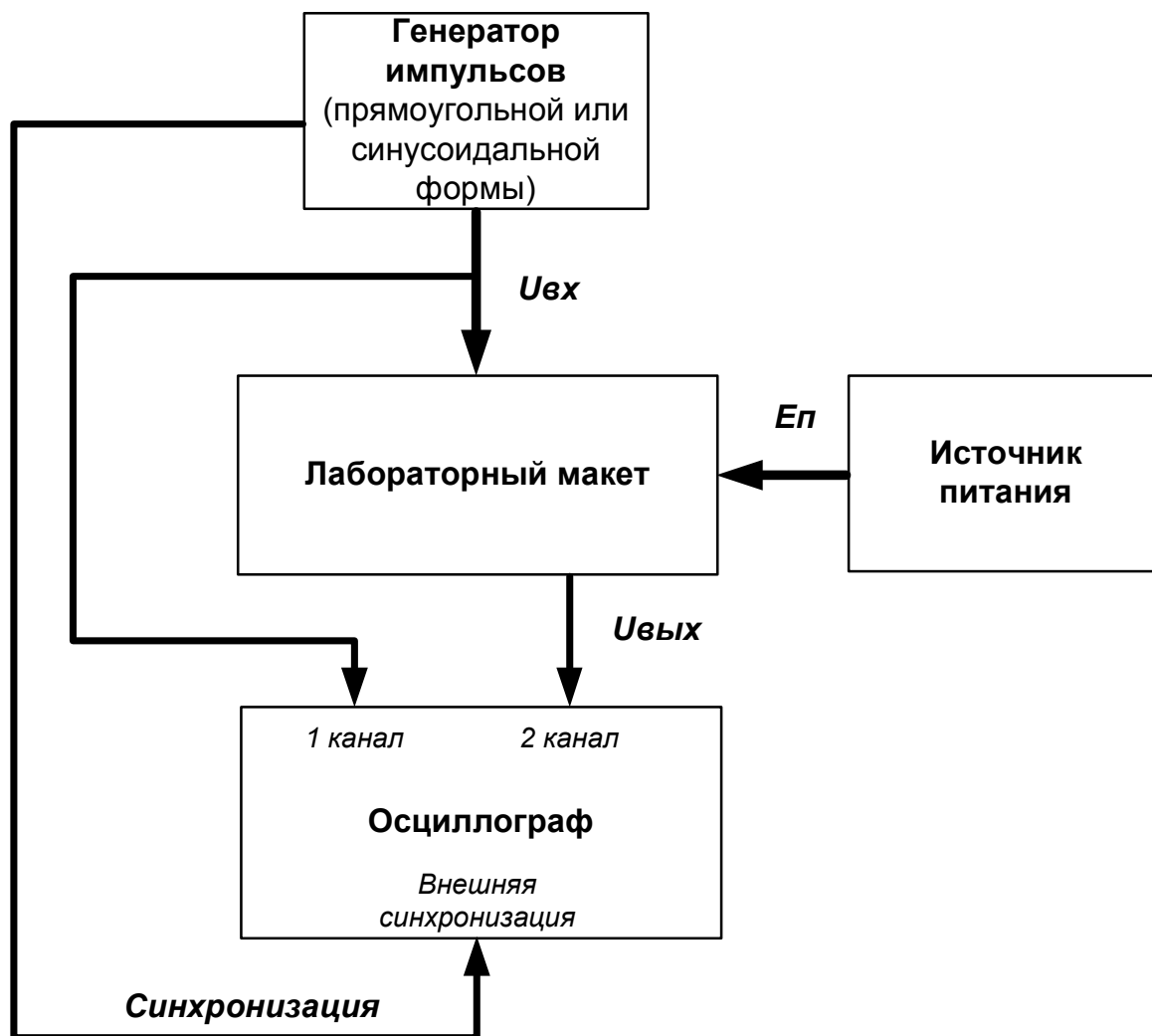


Рис. 1 Структурная схема лабораторного стенда

### 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).

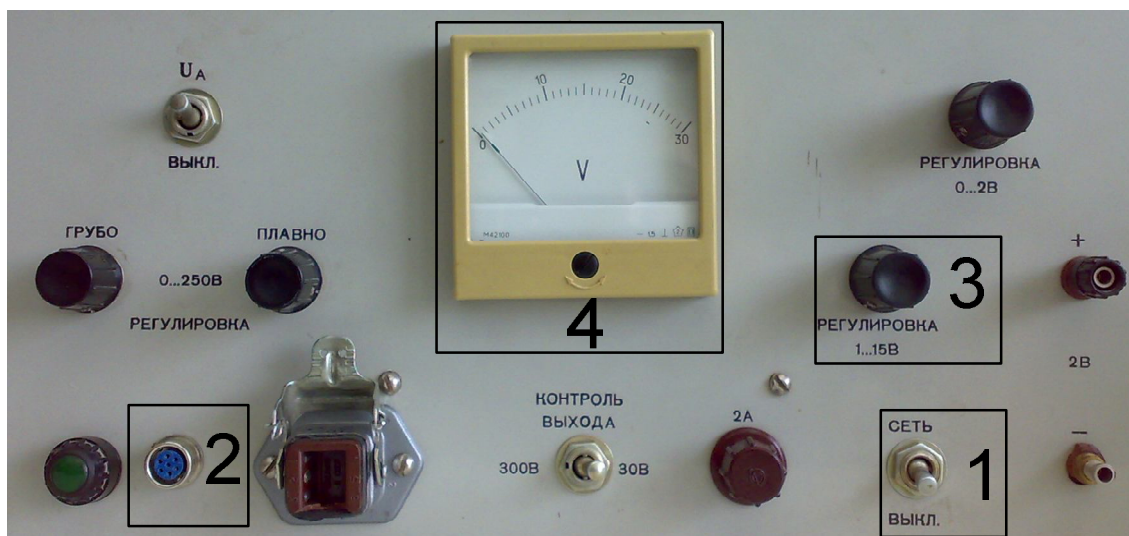


Рис. 2 Лицевая панель источника питания:

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).

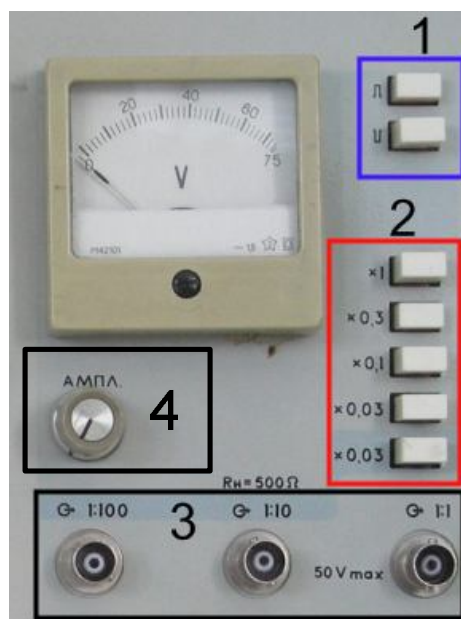
### 1.2.1. Генератор прямоугольных импульсов

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

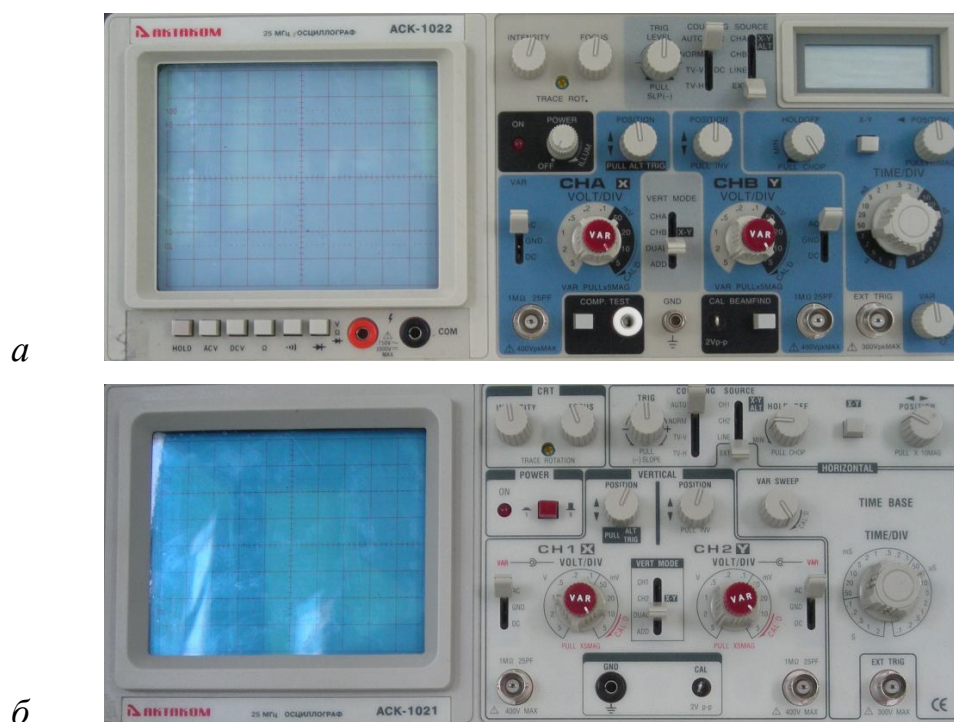


Рис. 5 Лицевые панели осциллографов

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**).

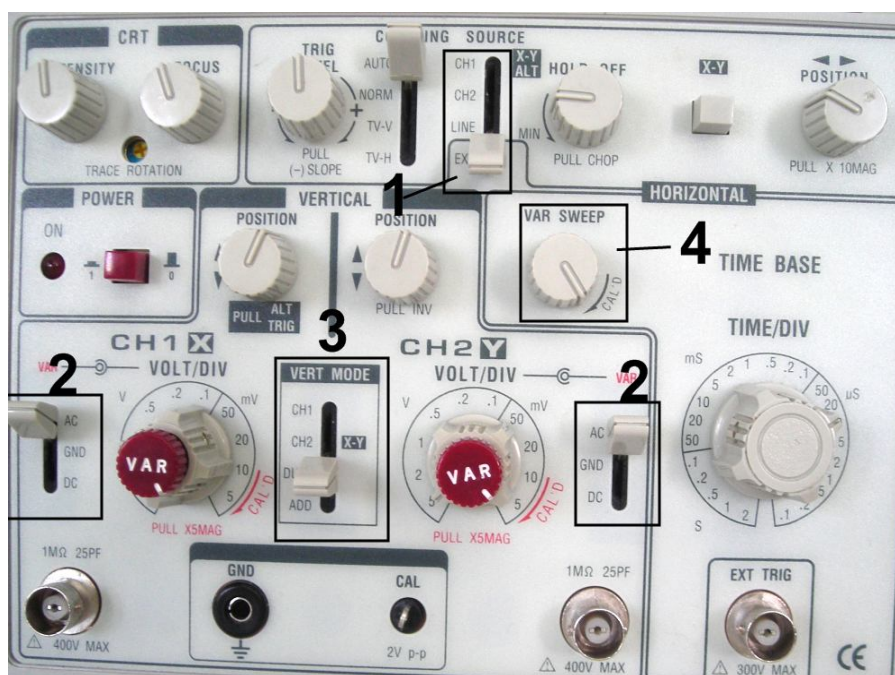


Рис. 6 Основные органы управления осциллографом



## 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.

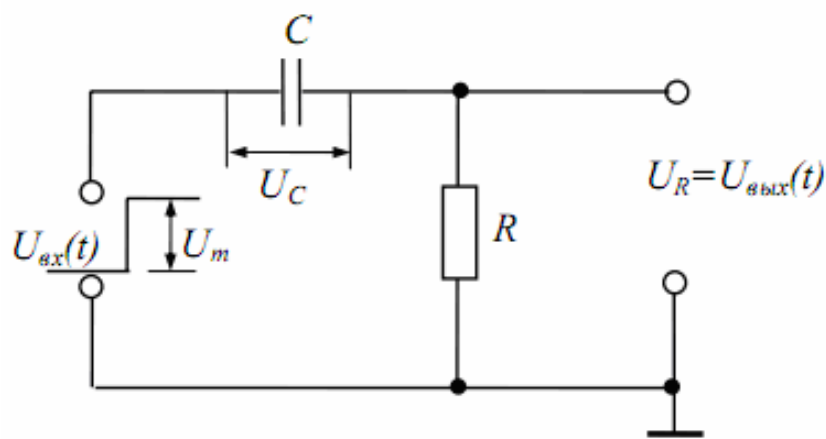
**Делительная цепь** используется для передачи сигнала с минимальными искажениями, пропускает только переменную составляющую сигнала.

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

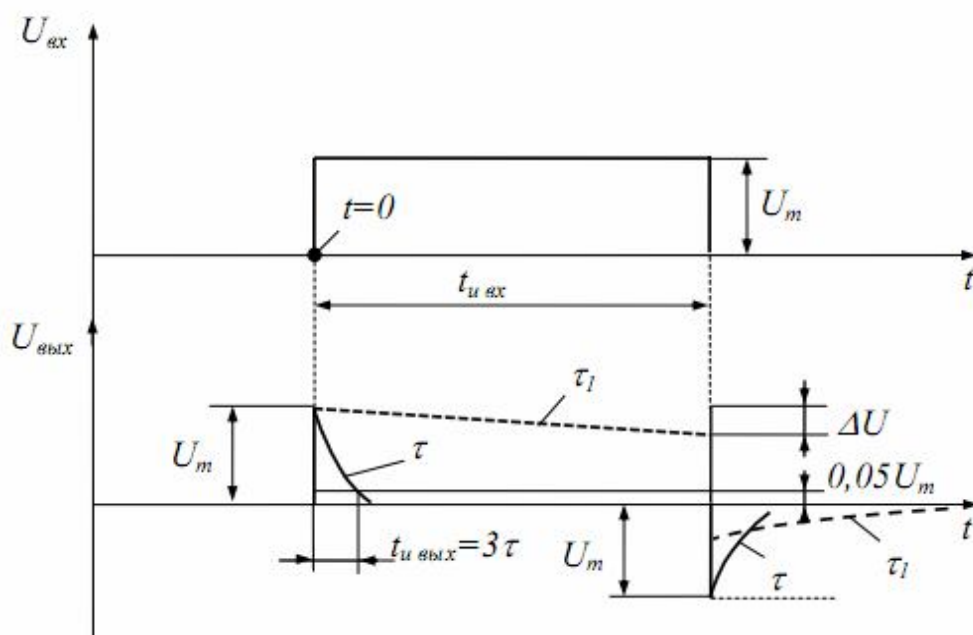
В любой момент времени для цепи справедливо соотношение:

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

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:

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

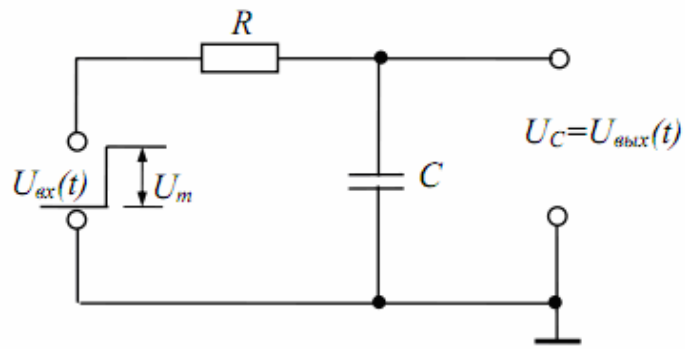
Очевидно, что для получения относительного спада вершины импульса меньше 1 % необходимо выбрать постоянную времени, по крайней мере, в 100 раз больше длительности импульса.

### 2.1.2. Интегрирующая цепь

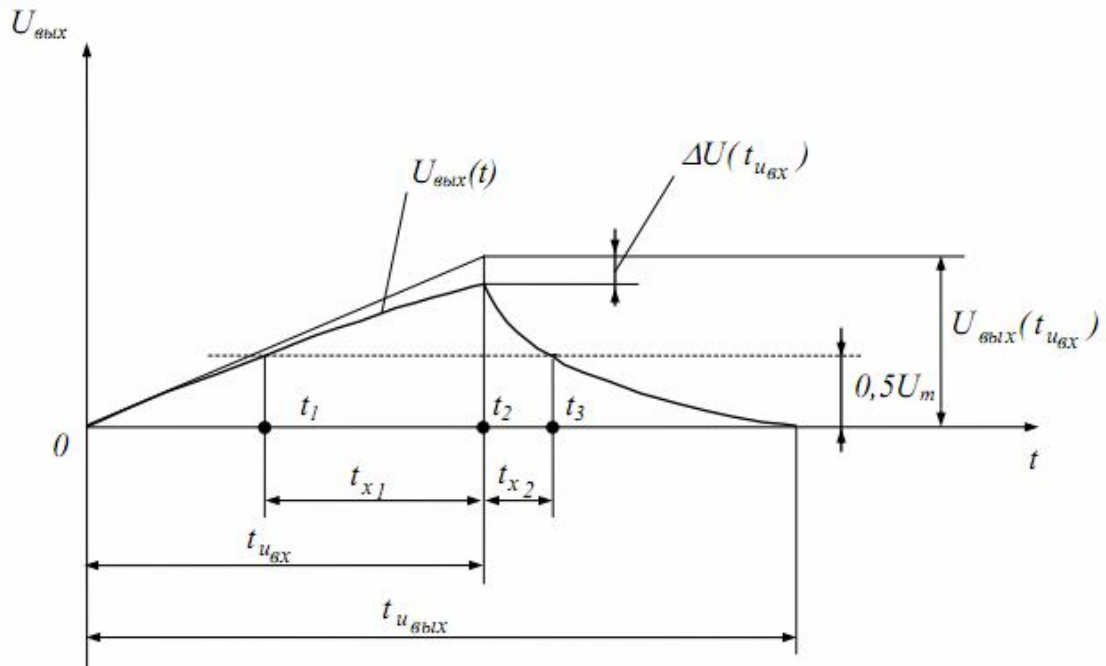
Простейшим интегрирующим элементом можно считать конденсатор или индуктивную катушку. На Рис. 8, а показана  $RC$ -цепь, в которой напряжение снимается с конденсатора.

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:

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

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

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

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.

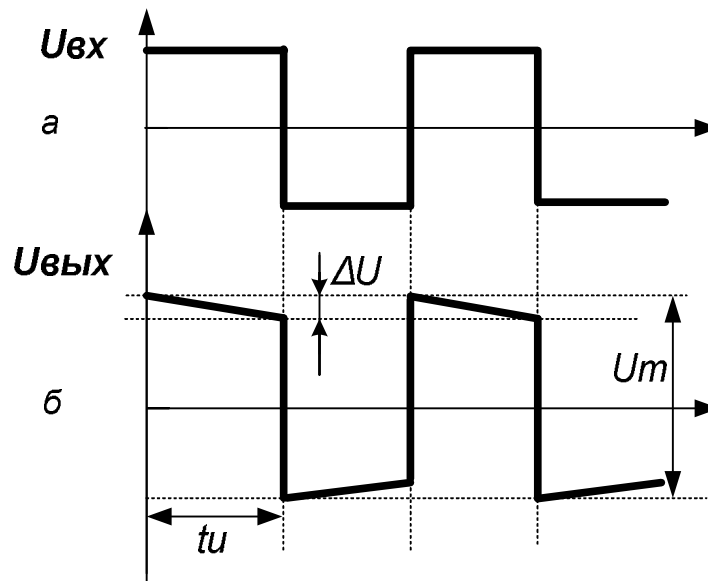


Рис. 9 Временные диаграммы входного (а) и выходного (б) напряжений разделительной цепи

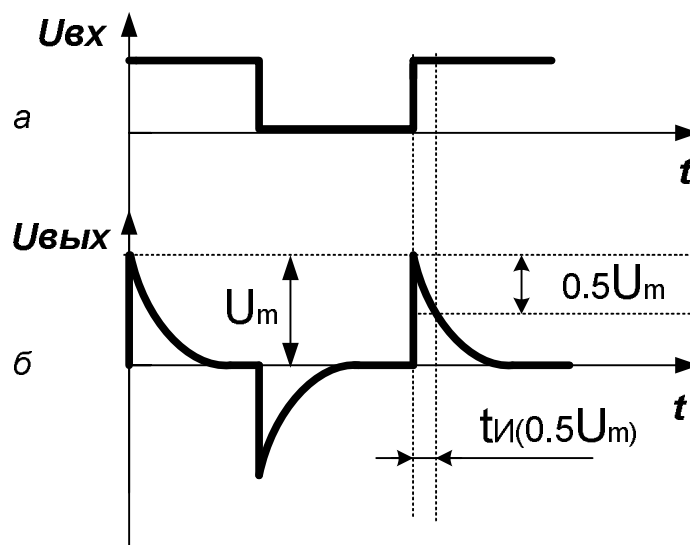


Рис. 10 Временные диаграммы входного (а) и выходного (б) напряжений дифференцирующей цепи

### 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  $R_H$  к выходу цепи. Положение ВВЕРХ переключателя SA1 соответствует режиму ВЫКЛЮЧЕНО, ВНИЗ — ВКЛЮЧЕНО. Номиналы элементов схемы приведены в приложении 1.

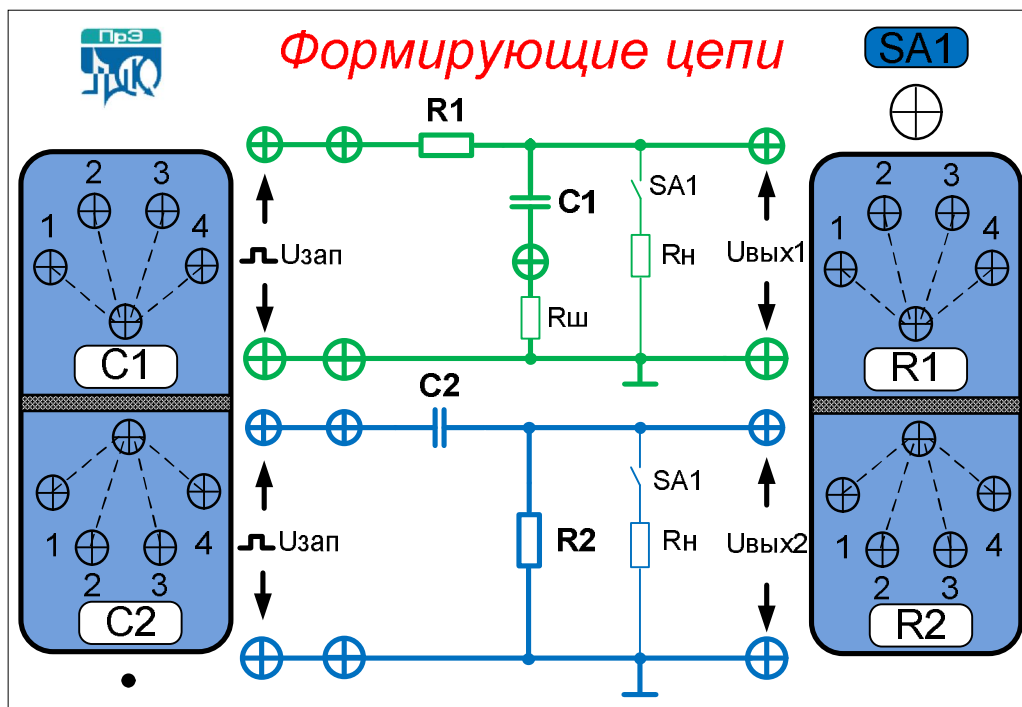


Рис. 11 Схема лицевой панели лабораторного макета

### 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  $\gamma$  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  $\tau$  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:

$$I_{к\text{нас}} = E_k / R_k \quad (3.1)$$

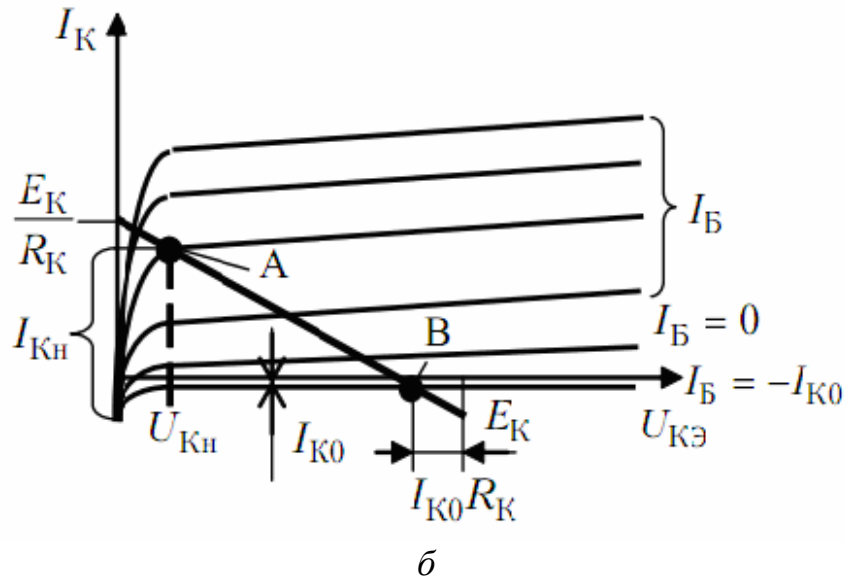
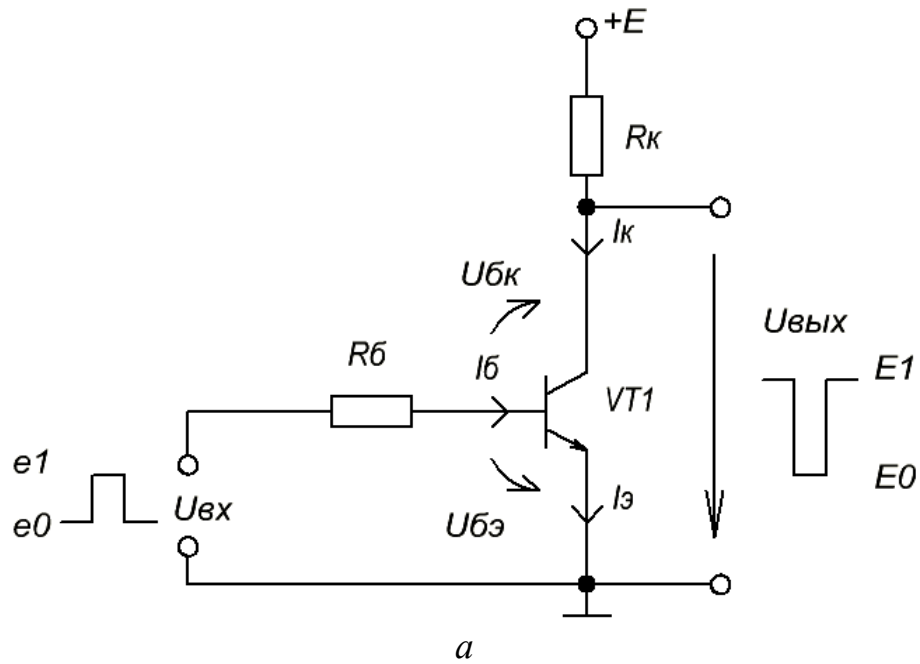


Рис. 12 Транзисторный ключ (а) и его вольт-амперная характеристика (б)

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

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

$$I_Б \geq I_{Бнас}. \quad (3.2)$$

Ток базы ограничен резистором  $R_Б$  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  $I_{\kappa}$ :

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

где  $\beta$  — 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  $\tau_{\beta}$ , 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  $\tau_{\beta}$  до  $I_{K0}$  в течение интервала времени  $t_c$ .

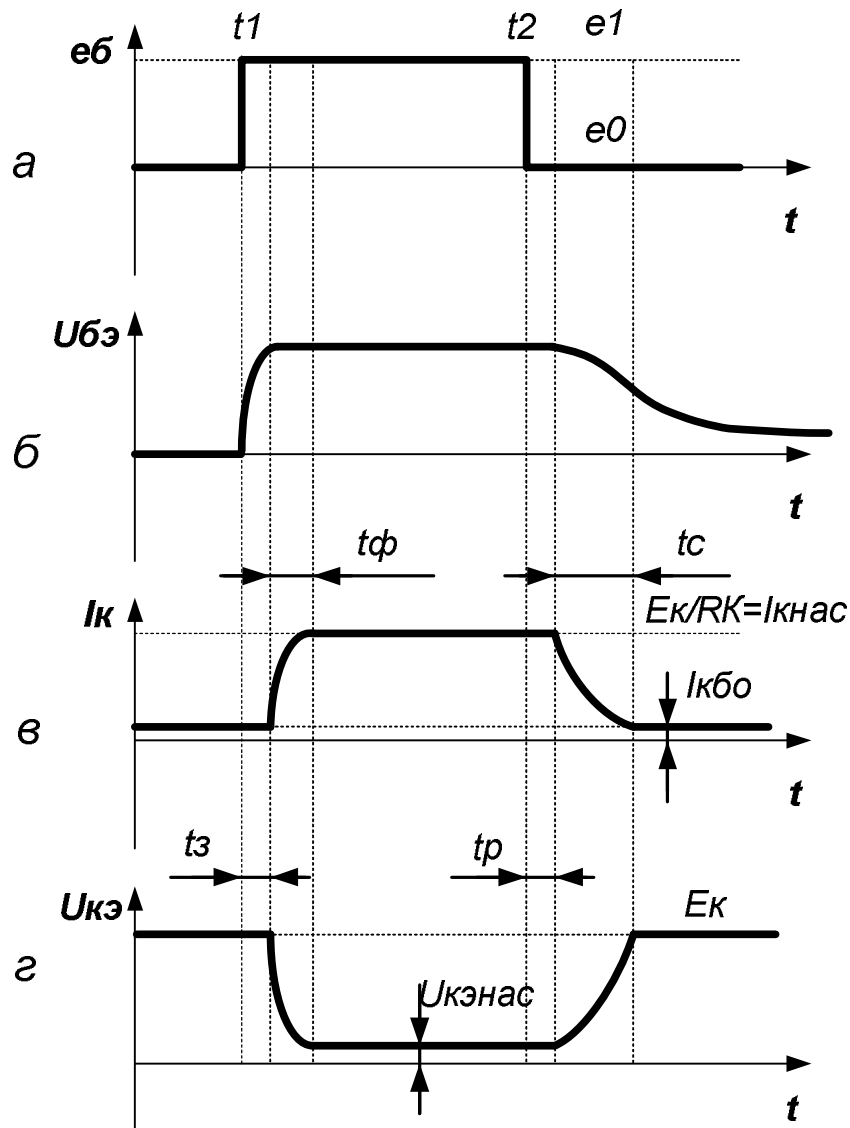


Рис. 13 Временные диаграммы: входного напряжения (а), напряжения на базе (б), тока коллектора (в) и напряжения на коллекторе (г) транзистора

Время включения ключа определяется задержкой включения  $t_z$  и длительностью фронта  $t_\phi$ . Задержка включения обусловлена перезарядом входной емкости  $C_{ex}$ . Время задержки включения определяется соотношением:

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

где  $C_{ex} = C_{\bar{\beta}} + C_k$ ;

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

$C_k$  — емкость коллекторного перехода;

$U_{\bar{\beta}z}$  — 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 ( $f_\beta$ ) и в схеме с общей базой ( $f_\alpha$ ).

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).

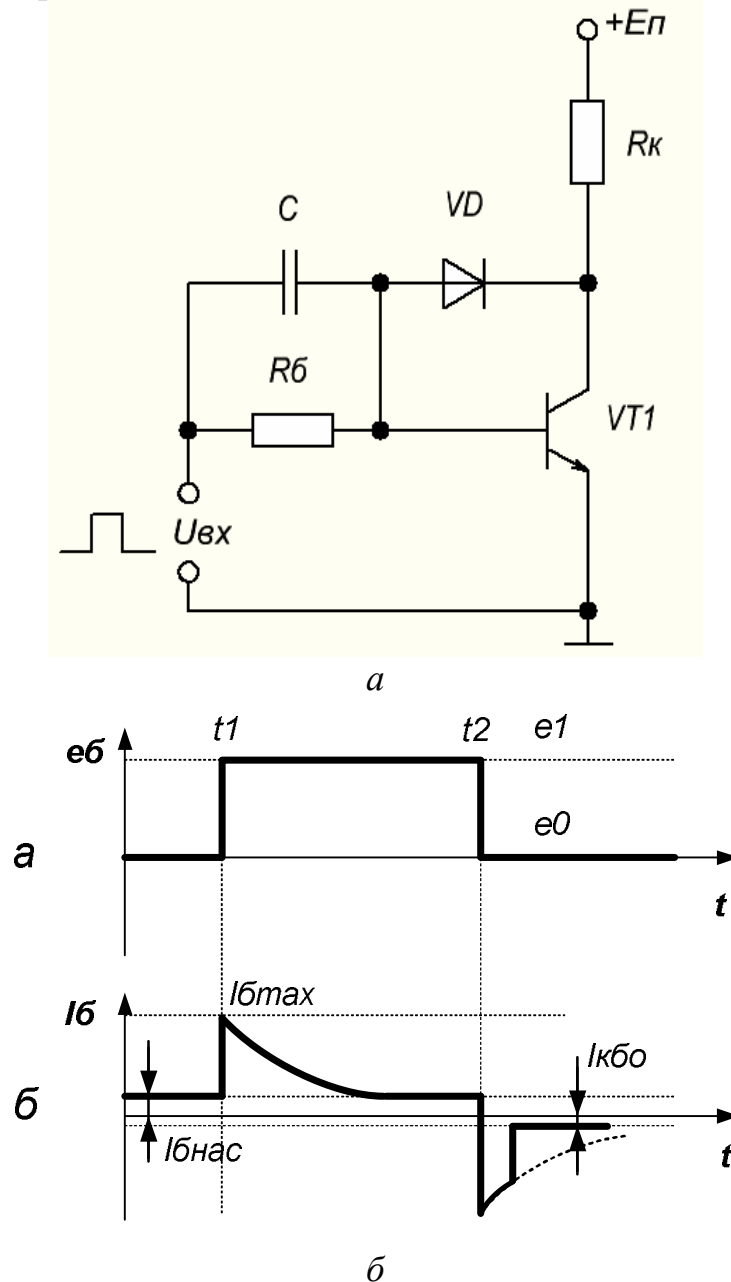


Рис. 14 Переходные процессы в транзисторном ключе с форсирующей емкостью

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  $I_{bmax}$ . По мере заряда конденсатора базовый ток уменьшается экспоненциально до значения  $I_{бнас} = \frac{U_{вх} - U_{бэ}}{R_b}$ . 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).



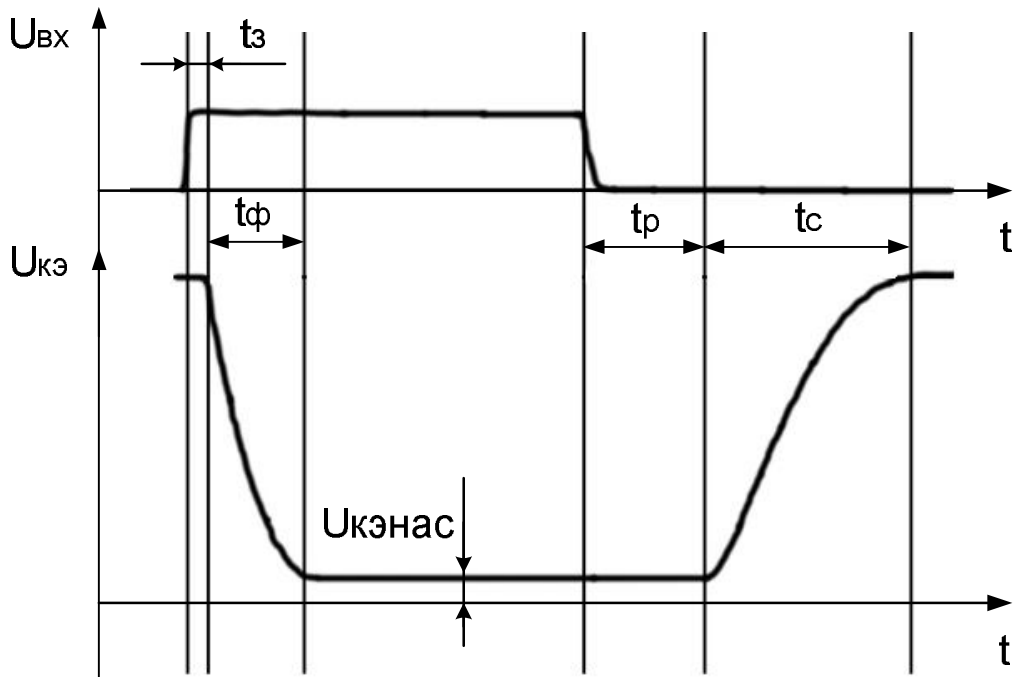


Рис. 15 Временная характеристика транзисторного ключа

### 3.2.2. Методика определения коэффициента усиления по току ( $\beta$ 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.

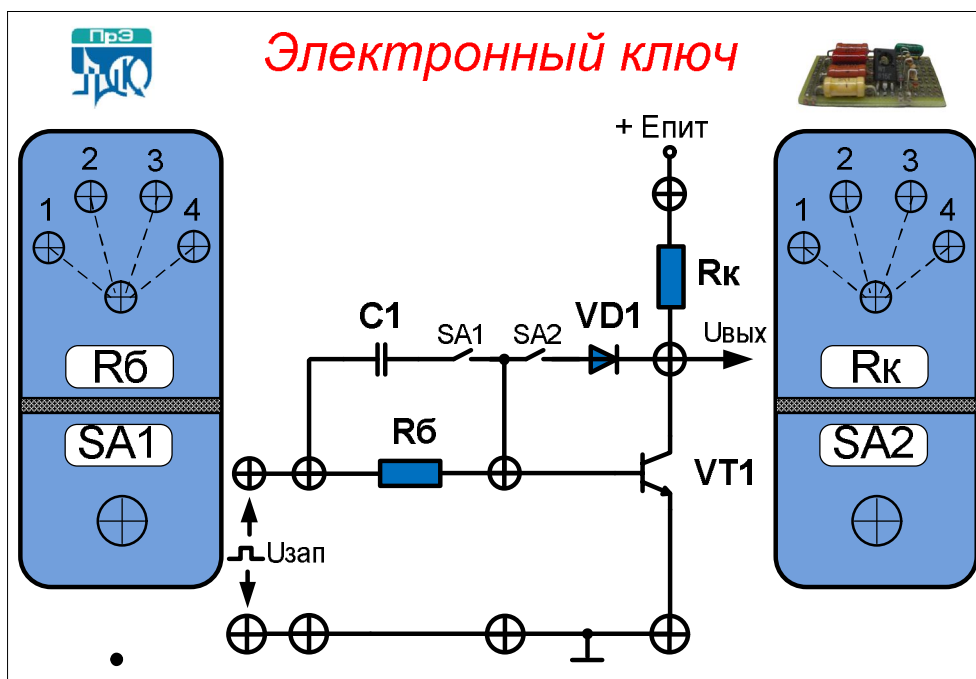


Рис. 16 Схема лицевой панели лабораторного макета

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  $R_{\kappa 3}$ ). 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 ( $R_{\beta}$ ) и коллекторного ( $R_{\kappa}$ ) 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  $R_{\beta}$  и коллекторного  $R_{\kappa}$  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  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$ , 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.

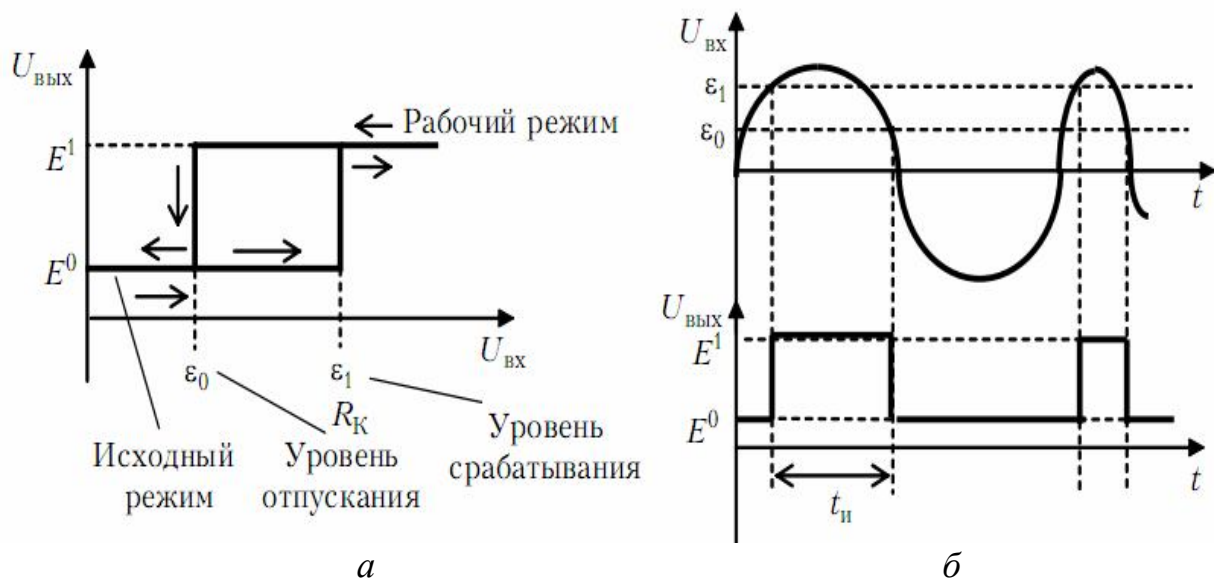


Рис. 17. Передаточная характеристика несимметричного триггера (а) и соответствующие ей временные диаграммы (б)

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  $\varepsilon_1$  ( $U_{\text{вх}} = \varepsilon_1$ ) 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  $\varepsilon_0$  ( $U_{\text{вх}} = \varepsilon_0$ ) происходит скачкообразное переключение триггера в исходное состояние, и при  $U_{\text{вх}} < \varepsilon_0$  состояние триггера не изменяется. Пороговые уровни  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$  (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  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$ , 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  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$ . 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 запирированием транзистора  $VT2$ .

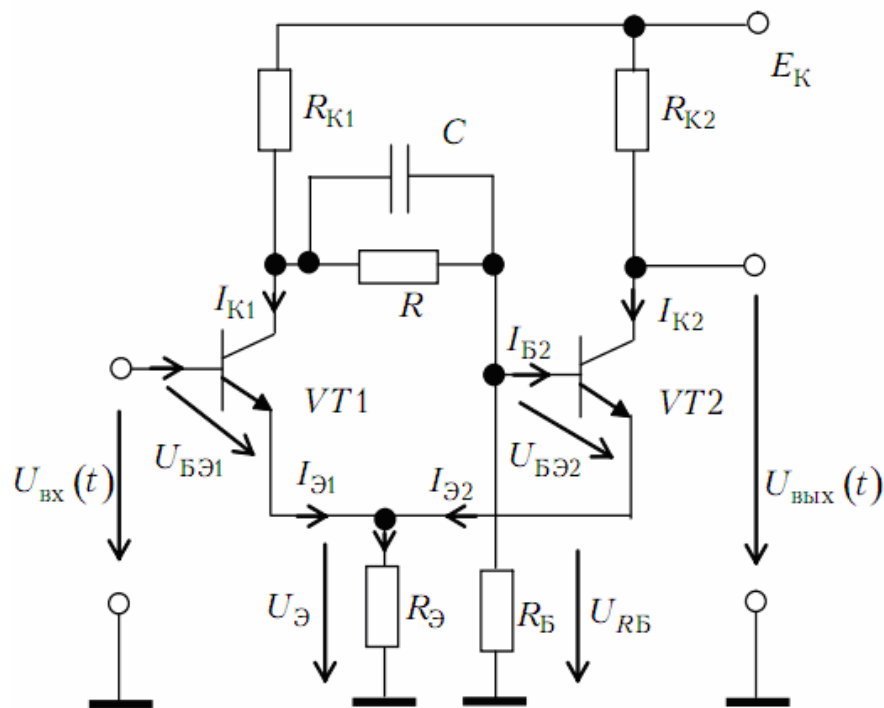


Рис. 18. Триггер Шмидта на дискретных компонентах

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.

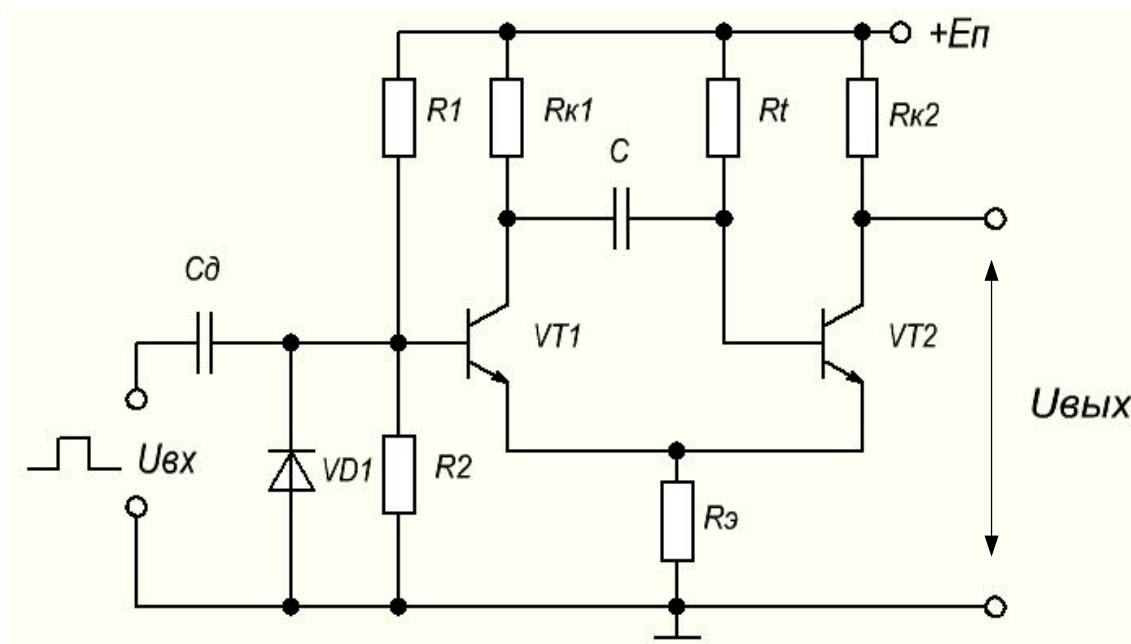


Рис. 19. Ждущий мультивибратор

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  $R_{K1} > R_{K2}$ .

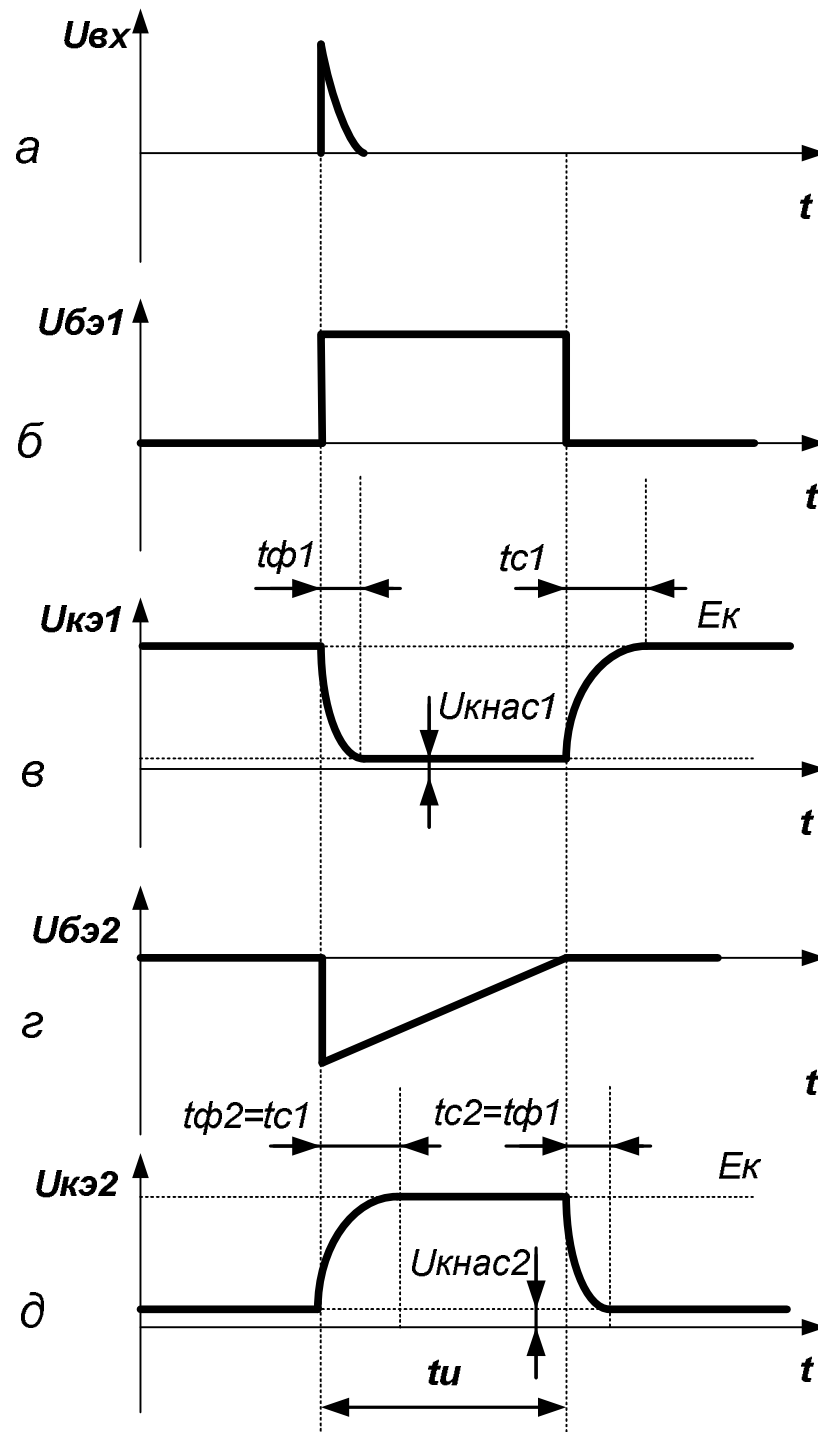


Рис. 20. Временные диаграммы работы ждущего мультивибратора

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).

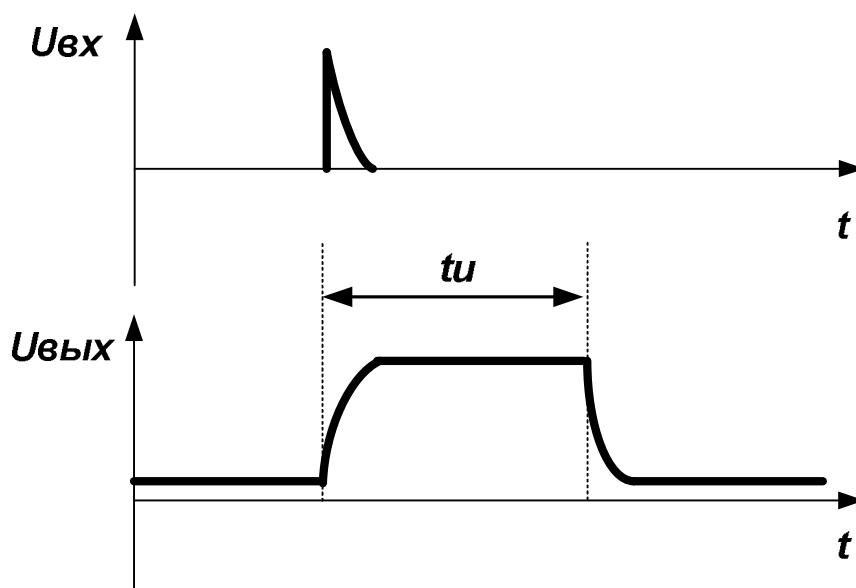


Рис. 21. Определение длительности выходного импульса

### 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.

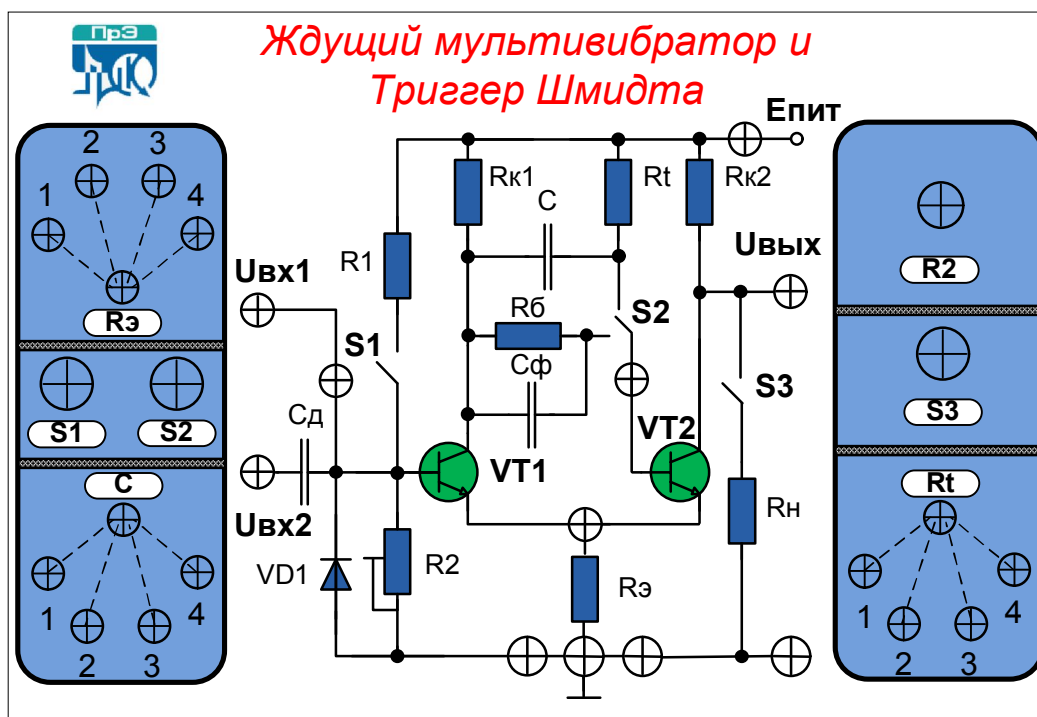


Рис. 22. Схема лицевой панели лабораторного макета

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

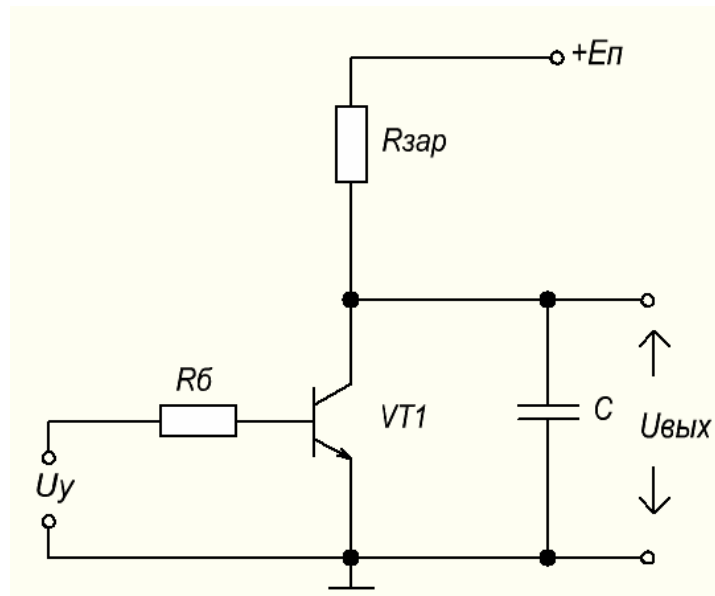
Простейшая схема генератора линейно изменяющегося напряжения приведена на Рис. 23, а. Линейно изменяющееся напряжение образуется при заряде конденсатора  $C$  через резистор  $R_{зар}$  от источника  $E_n$ . Транзистор  $VT1$ , работающий в ключевом режиме, переключает конденсатор с заряда на разряд.

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  $\tau_{зар} = R_{зар} C$ .

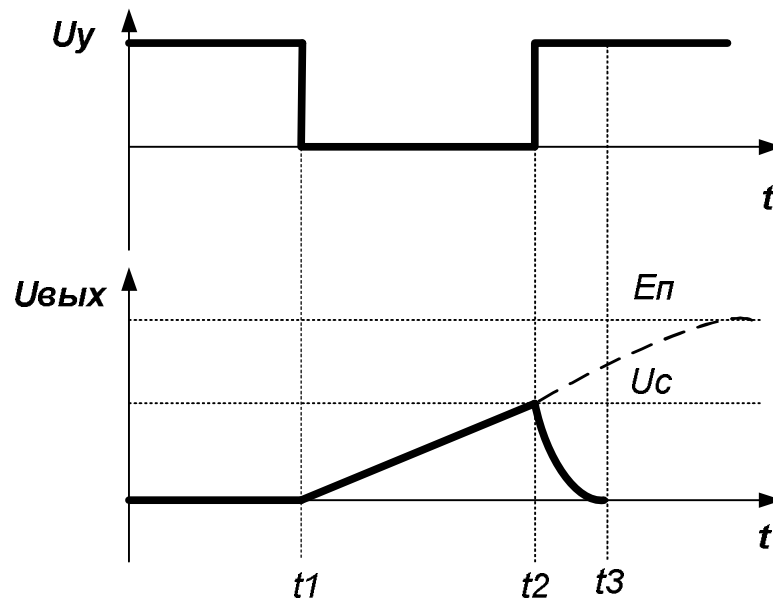
В этом случае выходная цепь генератора представляет собой интегрирующую цепь, в которой напряжение источника  $E_n$  является входным. Напряжение на выходе такой цепи меняется по экспоненциальному закону, стремясь к  $E_n$ . Подаваемое в момент времени  $t_2$  отпирающее напряжение открывает транзистор 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 С);

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

$U_{\text{max}}$  — амплитуда пилообразных импульсов;

$K_{\text{И.П}}$  — коэффициент использования напряжения источника питания, который показывает, насколько амплитуда пилообразного напряжения  $U_{\text{max}}$  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).

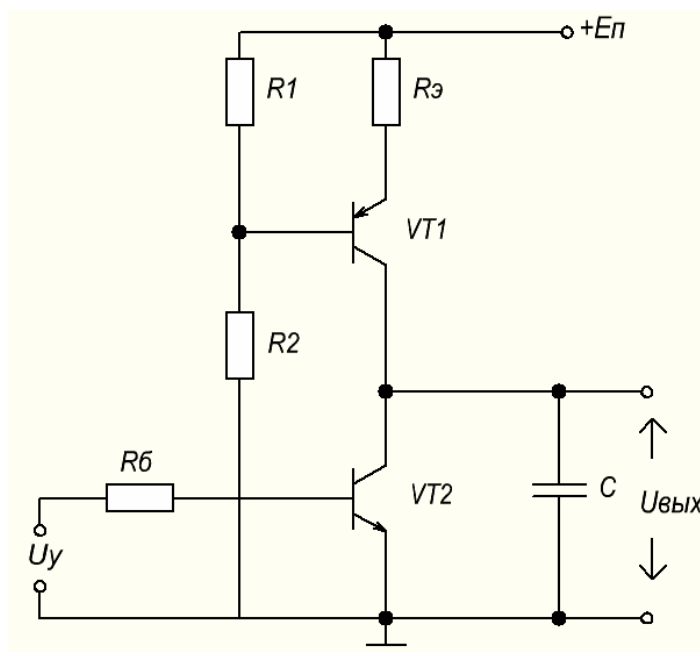


Рис. 24. Генератор линейно нарастающего напряжения со стабилизатором тока

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.

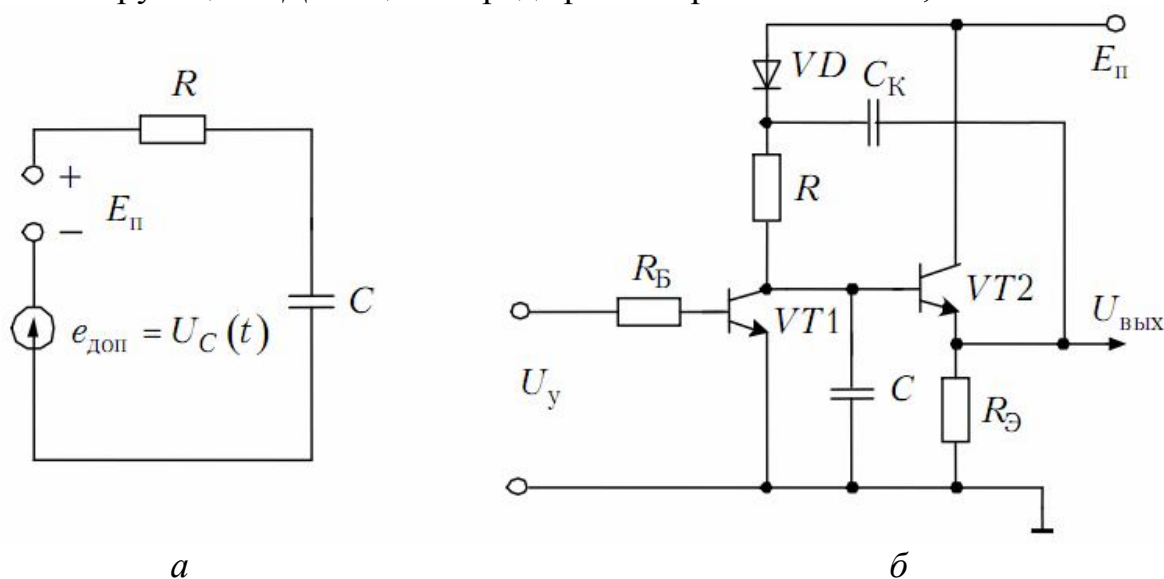


Рис. 25. Генератор линейно нарастающего напряжения с компенсирующей ЭДС: а – включение компенсирующей ЭДС; б – принципиальная схема

На интегрирующую цепь действует сумма двух напряжений  $E_{\Pi}$  и дополнительного изменяющегося напряжения  $e_{\text{доп}}$ . Процесс заряда конденсатора начинается при действии напряжения  $E_{\Pi}$ . 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  $E_{\Pi}$ , 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  $\beta$ ,  $R_B$ ,  $U_y$ , и параметрами  $RC$ -цепи при известных значениях  $E_{\Pi}$  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:

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

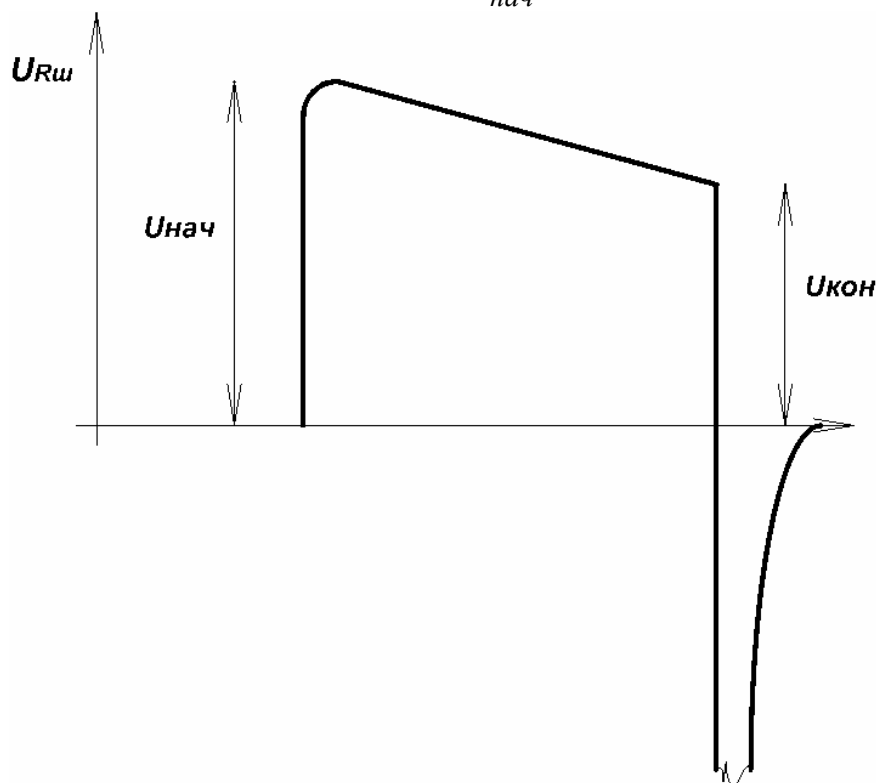


Рис. 26. Определение коэффициента нелинейности выходного напряжения

#### 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.

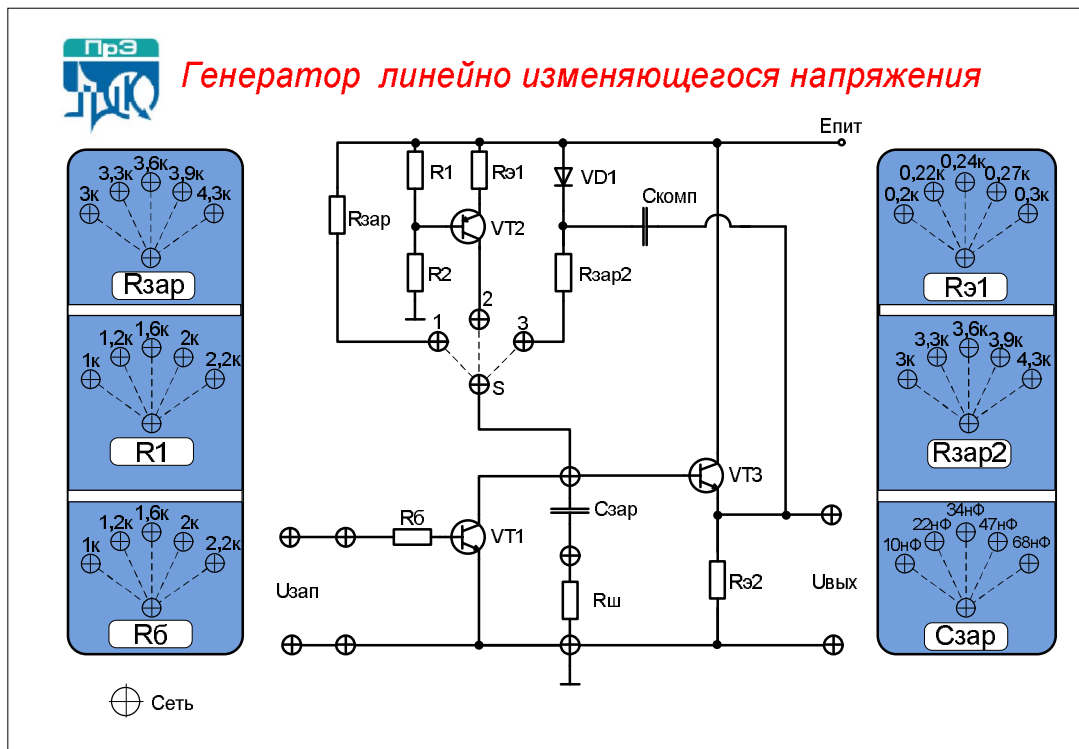


Рис. 27. Схема лицевой панели лабораторного макета

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  $R_6$ ,  $R_{зар}$ ,  $R_1$  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](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/](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  $f_{\alpha}$  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
$R_{\sigma}$	1	4,7 к
	2	8,1 к
	3	10 к
	4	43 к
$R_{\kappa}$	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					
	$R_{\delta}$	$R_{зар}$	$R_{зар2}$	$R_1$	$R_3$	$C_{зар}$
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
$R_{\delta}$ , 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

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