

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 21.01.2022 08:53:08  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c16aabbf73e947df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 6 » *декабрь* 2017 г.



## ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА Часть 2

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов  
направления подготовки 09.03.01 по дисциплине  
"Электротехника, электроника и схемотехника"

Курск 2017

УДК 681.3.049.77

Составители: В.И. Иванов, С.Н.Гвоздева

Рецензент

Кандидат технических наук *Лапина Т.И.*

**Электроника и схемотехника. Часть 2:** методические указания к выполнению лабораторных работ / Юго-Зап.гос.ун-т; сост.: В.И. Иванов., С.Н.Гвоздева. – Курск, 2017. – 35 с.

Содержат материал, необходимый для формирования у студентов знаний основ импульсной и цифровой схемотехники, принципов построения генераторов импульсных сигналов и логических элементов, привития навыков разработки и проектирования цифровых устройств.

Методические указания соответствуют Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, учебному плану направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, одобренному Ученым советом университета (протокол № 7 «29» февраля 2016 г.).

Предназначены для студентов направления подготовки 09.03.01 очной и заочной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *6.12.17*. Формат 60\*84 1/16.

Усл. печ.л. *1,7*. Уч.-изд.л. *1,6* Тираж 100 экз. Заказ *2413* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## **Оглавление**

ГЕНЕРАТОРЫ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ.....	4
ГЕНЕРАТОРЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ .....	11
ЛИНЕЙНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ.....	17
ИМПУЛЬСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ.....	22
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ТТЛ .....	28

## ГЕНЕРАТОРЫ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

### 1. Цель работы

Проектирование и исследование схем генераторов пилообразного напряжения (ГПН) и треугольного напряжения (ГТН), работающих в режиме самовозбуждения (в автоколебательном режиме).

### 2. Основные теоретические положения и описание принципиальной схемы

Генераторы пилообразного и треугольного напряжения вырабатывают импульсы линейно изменяющегося (нарастающего или убывающего) напряжения. Отличие ГПН и ГТН состоит в том, что в первом из них напряжение изменяется по линейному закону только на стадии «прямого хода», а в другом – на обеих стадиях, – и «прямого» и «обратного» хода. И те, и другие генераторы могут работать как в ждущем, так и в автоколебательном режиме.

**Генераторы пилообразного напряжения (ГПН)** во время прямого хода формируют линейно изменяющееся напряжение, а во время обратного хода напряжение монотонно возвращается к начальному уровню обычно по экспоненциальному закону.

Цикл генератора, работающего в ждущем режиме, состоит из трех стадий:

1) рабочей стадии («прямого хода») длительностью  $T_{пр}$ , во время которой выходное напряжение изменяется по линейному закону от начального значения  $U_{нач}$  до конечного  $U_{кон}$ ;

2) стадии восстановления («обратного хода») длительностью  $T_{обр}$ , во время которой напряжение возвращается к исходному значению  $U_{нач}$ ;

3) стадии ожидания длительностью  $T_{ож}$ . Если генератор работает в автоколебательном режиме, то стадия ожидания отсутствует.

Как правило, для получения линейно изменяющегося напряжения используется процесс заряда или разряда конденсатора. Скорость изменения напряжения на конденсаторе зависит от тока и емкости конденсатора:

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{i_C}{C}.$$

Для получения линейного напряжения в ГПН необходимо во время прямого хода обеспечить постоянство тока через конденсатор. Амплитуда выходного напряжения  $U_m = |U_{кон} - U_{нач}|$  равна

$$U_m = \frac{I_C T_{пр}}{C}. \quad (1)$$

Схема ГПН, принцип работы которого основан на заряде конденсатора постоянным током, представлена на рисунке 1. На рабочей стадии конденсатор  $C$  заряжается током стока полевого транзистора  $VT2$ , на стадии восстановления разряжается через транзисторный ключ  $VT1$ . Полевой транзистор  $VT2$  с каналом  $p$ -типа работает как источник стабильного тока  $I_C$ . Ток стока в области насыщения выходных характеристик при  $U_{си} > U_{си.нас}$  очень слабо зависит от напряжения сток-исток и определяется напряжением затвор-исток.

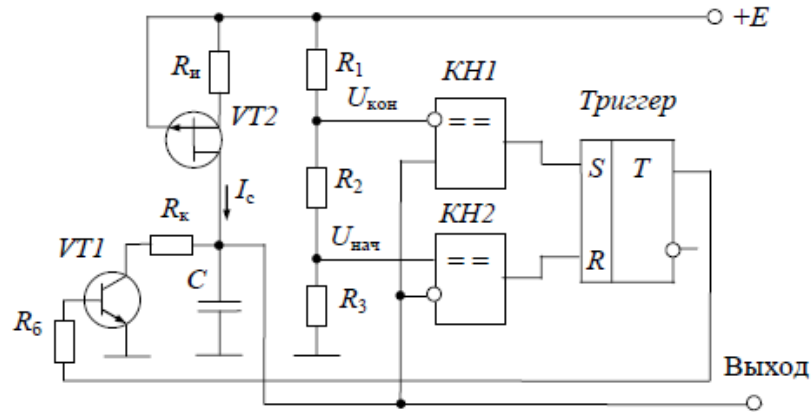


Рис. 1. Схема генератора пилообразного напряжения

Полевой транзистор работает в режиме автосмещения: напряжение смещения  $U_{зи}$  создается за счет падения напряжения на резисторе  $R_{и}$ . Величина тока стока устанавливается сопротивлением  $R_{и}$  в цепи истока. Начальное значение  $U_{нач}$  и конечное значение  $U_{кон}$  пилообразного напряжения задаются резисторным делителем  $R1-R2-R3$ :

$$U_{нач} = \frac{R_3 E}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad U_{кон} = \frac{(R_2 + R_3) E}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (2)$$

Указанные уровни напряжения определяют амплитуду  $U_m$ . Длительность прямого хода

$$T_{пр} = \frac{U_m C}{I_c}. \quad (3)$$

Начало прямого хода синхронизируется выходным сигналом компаратора напряжений  $KH2$ , который устанавливает триггер по входу  $R$  ("Reset") в состояние "0", при этом транзистор  $VT1$  закрывается и начинается линейный заряд конденсатора. Когда напряжение на конденсаторе достигает  $U_{кон}$ , т.е. порога срабатывания компаратора напряжений  $KH1$ , последний переключает триггер по входу  $S$  ("Set") в состояние "1", при этом открывается транзистор  $VT1$ , через который происходит разряд конденсатора до напряжения  $U_{нач}$ .

Сопротивление  $R_{и}$  в цепи истока транзистора  $VT2$  можно предварительно рассчитать по формуле

$$R_{и} = \frac{U_{зи.отс}}{I_c} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{с.нач}}} \right), \quad (4)$$

где напряжение отсечки  $U_{зи.отс}$  и начальный ток  $I_{с.нач}$  – параметры транзистора,  $I_c$  – требуемый ток заряда. Значения параметров  $U_{зи.отс}$  и  $I_{с.нач}$  следует найти в свойствах полевого транзистора. Например, у транзистора J2N5021  $U_{зи.отс} = 1$  В,  $I_{с.нач} = 2,66$  мА. Для получения тока, равного 1 мА, расчетное сопротивление  $R_{и} = 387$  Ом. Более точно ток регулируют подбором сопротивления  $R_{и}$ .

**Генераторы напряжения треугольной формы (ГТН)** отличаются от ГПН тем, что у них как заряд, так и разряд конденсатора осуществляется токами, значение которых неизменны. Принцип работы ГТН также базируется на выполнении операций интегрирования и сравнения. Поэтому схемы релаксационных генераторов колебаний пилообразной, треугольной и прямоугольной формы, как правило, идентичны, а форма сигнала определяется точкой, которая принимается за выход.

Генератор сигналов треугольной формы, схема которого представлена на рисунке 2, включает в свой состав интегратор на ОУ DA2, пороговый детектор (типа триггера Шмитта) на ОУ DA1 и параметрический стабилизатор напряжения R1, VD1, VD2.

На выходе первого ОУ, работающего в качестве порогового устройства, устанавливается одно из двух возможных состояний насыщения и в точке *a* формируется напряжение, равное либо  $U_{a.max} = U_{ст} + U_{д.пр}$ , либо  $U_{a.min} = -(U_{ст} + U_{д.пр})$ . В зависимости от его полярности конденсатор интегратора может заряжаться или разряжаться, в результате чего выходное напряжение изменяется по линейному закону со скоростью

$$\frac{du_{\text{вых}}}{dt} = -\frac{U_a}{R_2 C} \quad (5)$$

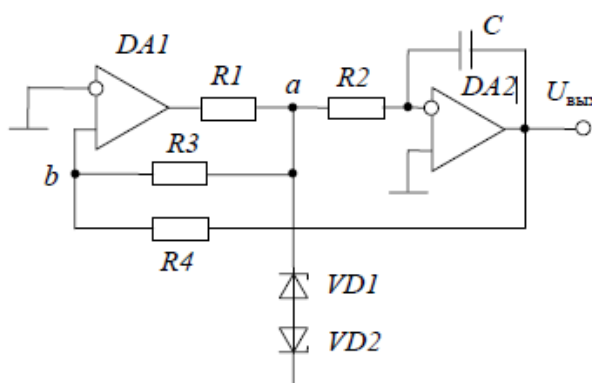


Рис. 2. Генератор напряжения треугольной формы

Когда напряжение в точке *a* имеет высокий уровень  $U_{a.max}$ , выходное напряжение понижается. Как только оно достигает минимального значения, равного

$$U_{\text{вых.min}} = -U_{a.max} \frac{R_4}{R_3},$$

напряжение в точке *b* проходит через нулевой уровень, состояние выхода порогового детектора DA1 скачком изменяется на противоположное, и в точке *a* устанавливается напряжение низкого уровня  $U_{a.min}$ . Это приводит к смене знака скорости изменения выходного напряжения интегратора, и оно повышается до максимального уровня

$$U_{\text{вых.max}} = -U_{a.min} \frac{R_4}{R_3}.$$

В результате на выходе генератора формируется напряжение  $u_{\text{вых}}$  треугольной формы с периодом

$$T = 4 \frac{R_4}{R_3} R_2 C \quad (6)$$

Диаграммы напряжений в схеме ГТН изображены на рисунке 3. Чтобы обеспечить симметрию положительного и отрицательного треугольников выходного напряжения, токи перезаряда интегратора должны значительно превышать входные токи ОУ DA2. Если его напряжение смещения  $U_{см}$  гораздо меньше значения  $U_{\text{вых.max}}$ , то смещение выходного сигнала относительно нулевого уровня будет практически отсутствовать. Регулировку частоты выходного напряжения целесообразно осуществлять подстройкой резистора R2.

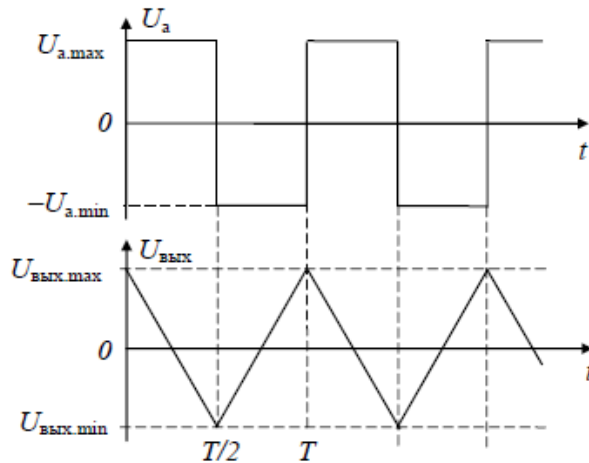


Рис. 3. Диаграммы напряжений в схеме ГТН

Амплитудой выходного напряжения ГТН называют перепад напряжения на выходе интегратора:

$$U_{\text{вых.м}} = U_{\text{вых.маx}} - U_{\text{вых.миn}}$$

Амплитуду можно выразить с помощью значений напряжения в точке *a*:

$$U_{\text{вых.м}} = \frac{R_4}{R_3} (U_{a.\text{маx}} - U_{a.\text{миn}}) \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет найти сопротивления резисторов  $R_3$  и  $R_4$ .

### 3. Программа исследований и методические указания

Работа проводится на персональном компьютере с помощью программы схемотехнического моделирования **Electronics Workbench 5.0c**.

#### 1. Исследование ГПН с генератором стабильного тока

Собрать схему генератора пилообразного напряжения с источником стабильного тока (рис. 4). Исходные данные для проектирования схемы ГПН приведены в табл. 1.

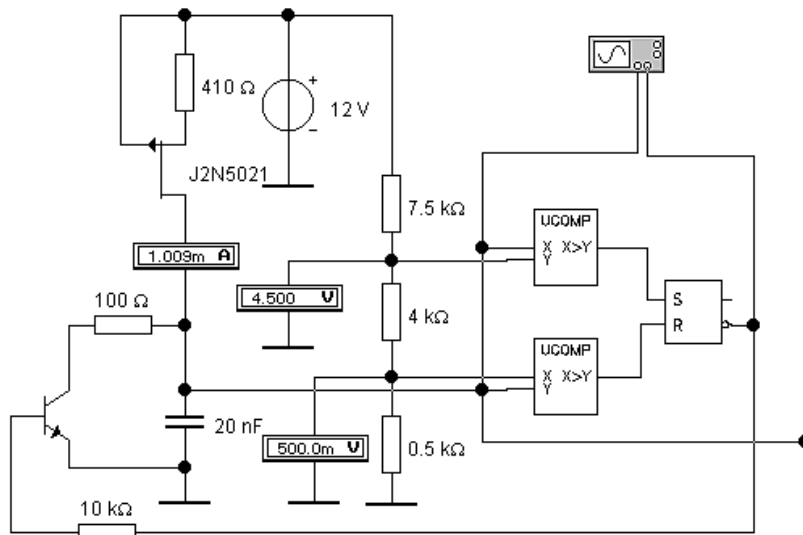


Рис. 4. Генератор пилообразного напряжения с источником тока

Используя формулы (1) – (4), рассчитать компоненты схемы генератора, включая сопротивления резисторного делителя  $R_1, R_2, R_3$ , которые обеспечивают заданные параметры пилообразных импульсов. При расчете сопротивлений резисторного делителя в схеме ГПН с источником стабильного тока принять ток через резисторы  $R_1 - R_3$ ,

равным 1 мА. Тогда падение напряжения на каждом резисторе численно равно его сопротивлению (в кОм).

При вычислениях по формулам (1) – (7) использовать единицы измерений:

- 1) Вольты – для напряжений;
- 2) мА – для тока;
- 3) мкс – для интервалов времени;
- 4) нФ – для емкости;
- 5) кОм – для сопротивлений.

Установить в свойствах компаратора (модель **Comparator** из магазина **Analog ICs**) параметр **Input Offset Voltage** (Напряжение смещения) 0 V.

Таблица 1. Варианты заданий

Вариант	$U_{\min}$ , В	$U_{\max}$ , В	$U_{\text{м}}$ , В	$T_{\text{пр}}$ , мкс	$I_c$ , мА	$C$ , нФ
1		6.0	5.0	100		20
2	0.5		6.0		1.5	15
3	1.5	6.0		90	1.5	
4		6.0	4.0	80		20
5	0.5		6.0		1.5	45
6	1.5	6.5		100	2.0	
7		6.0	4.0	75		30
8	1.0		5.4		2.7	50
9	0.5	6.5		75	2.4	
10		6.5	5.0	80		40
11	2.0		4.0		2.0	45
12	1.0	6.0		100	2.5	
13		6.5	6.0	120		30
14	1.5		5.0		2.0	40

Построить с помощью осциллографа временные диаграммы напряжений на конденсаторе  $C$  и на выходе триггера. На основании этих осциллограмм проверить соответствие результатов эксперимента заданию в табл. 1.

Для получения качественного изображения и синхронизации всех временных диаграмм войти в меню: **Analysis / Analysis Options... / Instruments / Oscilloscope** отключить “**Generate time steps automatically**”, установить в графе “**Minimum number of time points**” количество точек 400 или 500.

## 2. Исследование ГТН на интеграторе напряжения

Собрать схему ГТН на основе интегрирующего усилителя (рис. 5). Выбрать из библиотеки **Motor\_1n** модель стабилитрона, указанную в задании, и записать его параметр  $U_{\text{ст}}$ . Используя формулы (5) – (7), рассчитать компоненты схемы генератора, которые обеспечивают заданные параметры треугольных импульсов.

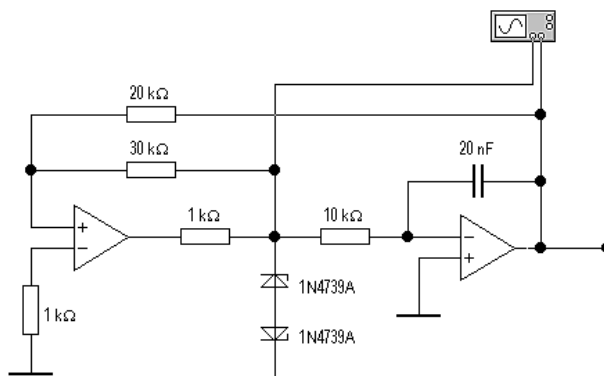


Рис. 5. Генератор треугольного напряжения

Исходные данные для проектирования схемы ГПН приведены в табл. 2.

Таблица 2. Варианты заданий



Вариант	Тип стабилитрона	$U_{\text{вых.м}}, \text{В}$	$T, \text{мкс}$	$R_3, \text{кОм}$	$R_4, \text{кОм}$	$C, \text{нФ}$	$R_2, \text{кОм}$
1	1N4731A	10	100	49		15	6
2	1N4732A	14	150		70	10	
3	1N4735A	12	120	68			10
4	1N4734A	15	80		75		5
5	1N4734A	12	100	62		20	
6	1N4736A	16	60		80		10
7	1N4737A	10	75	81		10	15
8	1N4738A	8	100		40		20
9	1N4739A	14	150	97		10	
10	1N4736A	10	120		50		8
11	1N4733A	12	80	57		20	
12	1N4736A	15	120		75	15	4
13	1N4738A	14	60	88			10
14	1N4740A	10	75		50	15	

Запустить цикл работы генератора. Построить с помощью осциллографа временные диаграммы напряжений в точке  $a$  и на выходе интегратора. На основании этих осциллограмм проверить соответствие результатов эксперимента заданию в табл. 2.

#### 4. Контрольные вопросы

1. Какой процесс используется в ГПН для получения линейно изменяющегося напряжения?
2. От чего зависит скорость изменения напряжения на конденсаторе?
3. Какое условие необходимо для получения линейного изменения напряжения на конденсаторе?
4. Каким образом задается в исследуемых генераторах требуемая амплитуда пилообразного напряжения?
5. От чего зависят длительности стадии прямого хода (выходного импульса) и стадии обратного хода (восстановления)?
6. От чего зависят длительности стадий заряда и разряда времязадающего конденсатора?
7. Почему полевой транзистор можно использовать в качестве источника постоянного тока?
8. Почему в ГПН во время обратного хода выходное напряжение изменяется не по линейному закону? А по какому?
9. В какие моменты времени происходит переключение направления изменения выходного напряжения ГТН?

#### 5. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) схемы исследуемых генераторов пилообразного и треугольного напряжения;
- 4) результаты расчета элементов ГПН и ГТН, осциллограммы напряжений и результаты измерения параметров генераторов.
- 5) титульный лист;
- 6) наименование работы и цель исследований;

#### Библиографический список

1. Электротехника и электроника: Учебное пособие / В.М. Бобырь, В.И. Иванов, В.С. Титов, А.С. Ястребов. В 2 кн. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т. – 2009. Кн. 2. – Электроника. – 240 с.

2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.

# ГЕНЕРАТОРЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

## 1. Цель работы

Проектирование и исследование схем генераторов прямоугольных импульсов, работающих в режиме самовозбуждения (автоколебательного мультивибратора) и в ждущем режиме (одновибратора).

## 2. Основные теоретические положения и описание принципиальной схемы

Генераторы импульсов напряжения прямоугольной формы, которые переключаются под воздействием процесса регенерации, называют мультивибраторами. Этот принцип получения прямоугольных импульсов используется как в схемах на дискретных компонентах, так и в интегральных микросхемах.

В данной работе исследуются генераторы прямоугольных импульсов на основе интегральной микросхемы КР 1006 ВИ1. Зарубежным аналогом этой микросхемы является таймер 555. Этот таймер может работать как в непрерывном (автоколебательном) режиме, так и в ждущем режиме. В первом режиме генератор называется *мультивибратором*, а во втором – *одновибратором* или *ждущим* мультивибратором.

На рисунке 1 представлена схема мультивибратора, работающего в автоколебательном режиме.

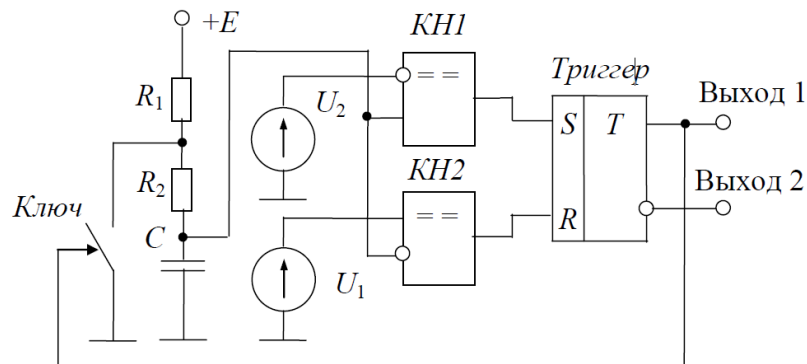


Рис. 1. Упрощенная схема генератора прямоугольных импульсов

Цикл мультивибратора состоит из двух интервалов. В первой части цикла электронный ключ  $S$  разомкнут, и конденсатор  $C$  заряжается через резисторы  $R1$  и  $R2$  от источника напряжения  $E$ . Когда напряжение на  $C$  достигает потенциала, равного  $U_2$ , срабатывает компаратор напряжений  $KH1$  и переключает триггер в состояние "1", при котором замыкается ключ  $S$ , и начинается разряд конденсатора  $C$  через резистор  $R2$  на общую шину. Когда напряжение на  $C$  понизится до потенциала, равного  $U_1$ , срабатывает компаратор напряжений  $KH2$  и переключает триггер в состояние "0", при котором электронный ключ  $S$  снова размыкается, и начинается заряд конденсатора  $C$ , т. е. новый цикл. Временные диаграммы в схеме мультивибратора показаны на рисунке 2.

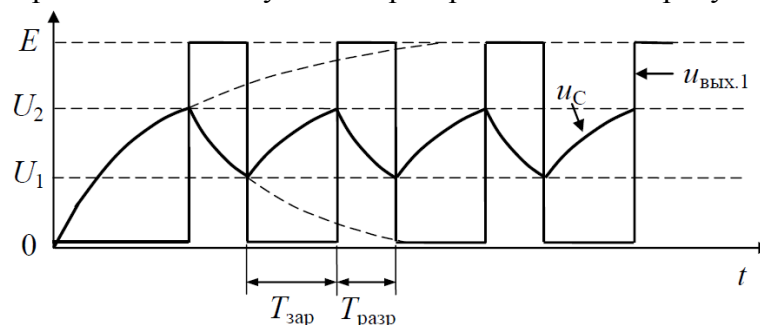


Рис. 2. Диаграммы напряжений на конденсаторе и выходе триггера

Напряжение на конденсаторе изменяется по экспоненциальному закону (поднимается при заряде и опускается при разряде) в пределах от  $U_1$  до  $U_2$ . Длительность стадии заряда определяется постоянной времени цепи заряда, равной  $(R_1 + R_2)C$ :

$$T_{\text{зар}} = (R_1 + R_2)C \ln \frac{E - U_1}{E - U_2}, \quad (1)$$

а длительность стадии разряда – постоянной времени цепи разряда, равной  $R_2C$ :

$$T_{\text{разр}} = R_2C \ln \frac{U_2}{U_1}. \quad (2)$$

Если сопротивление резисторов в (1) и (2) выражено в килоомах, а емкость – в нанофарадах, то время измеряется в микросекундах.

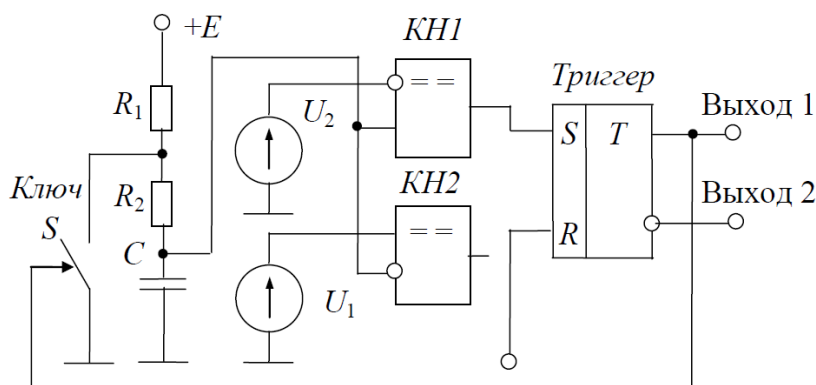


Рис. 3. Схема генератора прямоугольных импульсов в ждущем режиме

Схема включения генератора в ждущем режиме приведена на рисунке 3. В исходном состоянии, в котором генератор устойчиво находится до прихода запускающего сигнала, триггер установлен в состояние “1” и конденсатор  $C$  разряжен до нуля через замкнутый ключ  $S$ . По сигналу «Старт» триггер опрокидывается в состояние “0”, ключ  $S$  размыкается и начинается заряд конденсатора. Эта стадия продолжается до момента времени, когда напряжение на конденсаторе достигнет уровня  $U_2$  и сработает компаратор  $KH1$ , который возвращает триггер в состояние “1”. Во время стадии заряда конденсатора на выходе триггера формируется импульс выходного напряжения. Его длительность определяется постоянной времени цепи заряда, равной  $(R_1 + R_2)C$ :

$$T_{\text{вых}} = (R_1 + R_2)C \ln \frac{E}{E - U_2}. \quad (3)$$

После замыкания ключа  $S$  происходит восстановление исходного состояния – разряд конденсатора. Длительность стадии восстановления приблизительно равна четырем постоянным времени цепи разряда, равным  $R_2C$ :

$$T_{\text{восст}} \approx 4 R_2C. \quad (4)$$

Затем начинается стадия ожидания нового запуска.

Временные диаграммы в схеме одновибратора показаны на рисунке 4.

Следующий импульс запуска можно подавать только после завершения стадии восстановления. Выходные импульсы на прямом выходе триггера имеют отрицательную полярность, а на инверсном выходе – положительную.

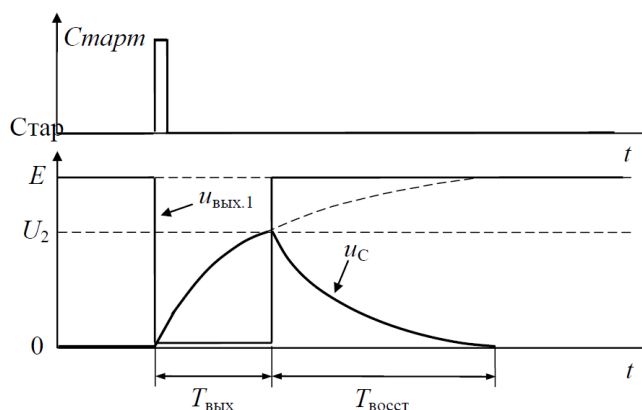


Рис. 4. Диаграммы напряжений в ждущем мультивибраторе

### 3. Программа исследований

Работа проводится на персональном компьютере с помощью программы схемотехнического моделирования **Electronics Workbench 5.0c**.

#### 1. Исследование мультивибратора в автоколебательном режиме

Собрать схему автоколебательного мультивибратора, приведенную на рисунке 5. Пороги срабатывания компараторов  $U_1$  и  $U_2$  задаются делителем напряжения. Все три резистора делителя напряжения имеют одинаковые сопротивления, поэтому верхний порог срабатывания **Comp1**  $U_2$  составляет  $2/3$  напряжения питания, а нижний порог срабатывания **Comp2**  $U_1$  равен  $1/3$  напряжения питания. После подстановки в формулы (1) и (2) указанных значений получим выражения для расчетов  $T_{зар}$  и  $T_{разр}$  в виде

$$T_{зар} = (R_1 + R_2)C_1 \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot (R_1 + R_2)C_1; \quad (5)$$

$$T_{разр} = R_2 C_1 \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot R_2 C_1. \quad (6)$$

Рассчитать емкость конденсатора  $C_1$  и сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , которые обеспечивают заданный период повторения импульсов  $T = T_{зар} + T_{разр}$ . Исходные данные для проектирования схемы мультивибратора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Варианты заданных параметров мультивибратора

Вариант	$T$ , мкс	$T_{зар}$ , мкс	$T_{разр}$ , мкс	$C_1$ , нФ	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм
1	350	210		10		
2	420	315			10	
3	315		105		20	
4	490		175			20
5	350		105			15
6	840	560		20		
7	420	280				15
8	630	420		20		
9	840		315		10	
10	700		210	10		
11	770	420		20		
12	560	350			20	
13	630		210		20	
14	490	280		10		

Установить в свойствах компаратора (модель **Comparator** из магазина **Analog ICs**) нулевое значение напряжения смещения (**Input Offset Voltage = 0**).

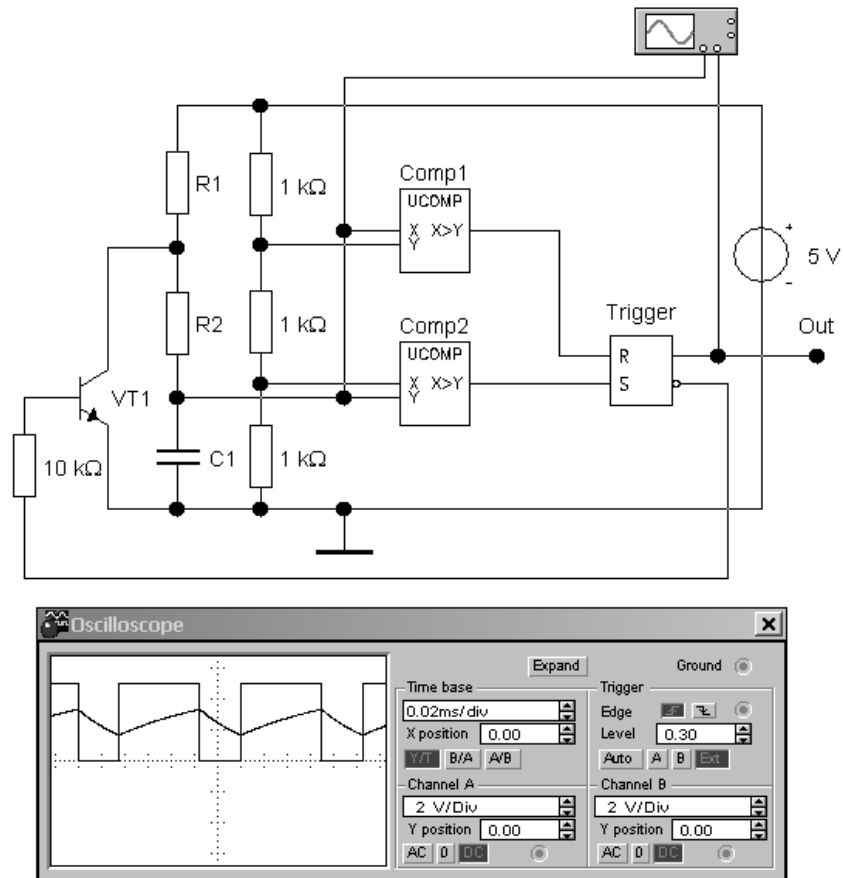


Рис. 5. Схема для исследования мультивибратора

Все три резистора делителя напряжения имеют одинаковые сопротивления, поэтому верхний порог срабатывания **Comp1**  $U_2$  составляет  $2/3$  напряжения питания, а нижний порог срабатывания **Comp2**  $U_1$  равен  $1/3$  напряжения питания. После подстановки в формулы (1) и (2) указанных значений получим выражения для расчетов  $T_{зар}$  и  $T_{разр}$  в виде

$$T_{зар} = (R_1 + R_2)C_1 \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot (R_1 + R_2)C_1; \quad (5)$$

$$T_{разр} = R_2 C_1 \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot R_2 C_1. \quad (6)$$

Рассчитать емкость конденсатора  $C_1$  и сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , которые обеспечивают заданный период повторения импульсов  $T = T_{зар} + T_{разр}$ . Исходные данные для проектирования схемы мультивибратора приведены в табл. 1.

Построить с помощью осциллографа временные диаграммы напряжений в пяти контрольных точках мультивибратора:

- на конденсаторе  $C_1$ ;
- на выходах обоих компараторов;
- на обоих выходах триггера.

Для получения качественного изображения временных диаграмм в меню: **Analysis / Analysis Options... / Instruments / Oscilloscope**, отключить “**Generate time steps automatically**”, установить в графе “**Minimum number of time points**” количество точек от 500 до 1000 и включить опцию **Pause after each screen** (режим однократной развертки).

Привести в отчете все пять осциллограмм, синхронизированных во времени.

## 2. Исследование ждущего мультивибратора

Собрать схему ждущего мультивибратора, изображенную на рисунке 2. Рассчитать емкость конденсатора  $C_1$  и сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , которые обеспечивают заданные длительности выходного импульса и стадии восстановления. Исходные данные для проектирования схемы одновибратора приведены в табл. 2. Учитывая, что в формуле (3)

напряжение  $U_2$  составляет  $2/3$  напряжения питания, длительность стадии заряда, в течение которой на выходе триггера вырабатывается выходной импульс, составляет

$$T_{\text{имп}} = (R_1 + R_2)C_1 \cdot \ln 3 \approx 1,1 \cdot (R_1 + R_2)C_1. \quad (7)$$

Таблица 2. Варианты заданных параметров одновибратора

Вариант	$T_{\text{имп}}$ , мкс	$T_{\text{вос}}$ , мкс	$C_1$ , нФ	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм
1	330	400	10		
2	495	600		20	
3	385	800			20
4	660	800	20		
5	385	800		15	
6	880	1600			20
7	440	800	10		
8	770	1200		20	
9	825	1200			10
10	495	600	10		
11	660	800		20	
12	990	2400			20
13	660	1200	15		
14	440	400		30	

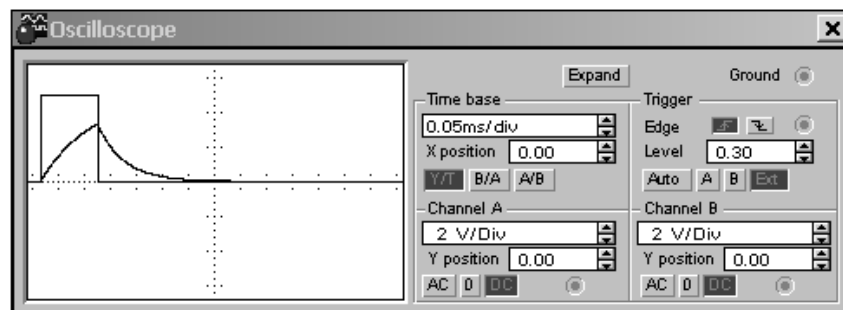
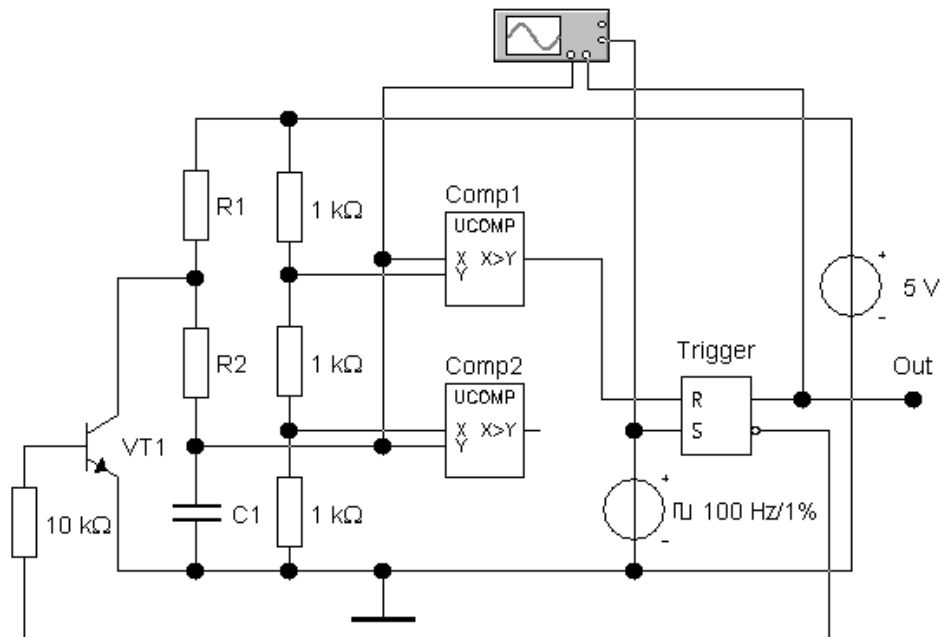


Рис. 6. Схема для исследования одновибратора

Установить на панели осциллографа в окне **Trigger** положительный фронт синхроимпульса (**Edge** ↑) и режим внешней синхронизации (**Ext**).

Построить с помощью осциллографа временные диаграммы напряжений в контрольных точках одновибратора:

- на выходе внешнего генератора;
- на конденсаторе  $CI$ ;
- на выходе компаратора Comp 1;
- на обоих выходах триггера.

#### 4. Контрольные вопросы

1. На чем основан цикл работы мультивибратора в автоколебательном режиме? Из каких стадий состоит рабочий цикл?
2. Каким образом фиксируются начало и конец каждой стадии цикла автоколебательного мультивибратора?
3. От чего зависят длительности стадий заряда и разряда времязадающего конденсатора?
4. Какую функцию выполняет триггер в схеме мультивибратора?
5. Каким образом устраняется влияние нестабильности напряжения питания на частоту выходных импульсов?
6. В каком режиме работает транзистор?
7. Чем отличается режим работы ждущего мультивибратора (одновибратора) от автоколебательного мультивибратора?
8. Из каких стадий состоит цикл работы одновибратора?
9. От чего зависят длительности рабочей стадии (выходного импульса) и стадии восстановления одновибратора?
10. Чем ограничена частота запускающих импульсов на входе одновибратора?

#### 5. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) схемы для исследования мультивибратора и одновибратора;
- 4) результаты расчета элементов мультивибратора и измерения его параметров, а также осциллограммы напряжений;
- 5) результаты расчета элементов одновибратора и измерения его параметров, а также осциллограммы напряжений.

#### Библиографический список

1. Электротехника и электроника: Учебное пособие / В.М. Бобырь, В.И. Иванов, В.С. Титов, А.С. Ястребов. В 2 кн. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т. – 2009. Кн. 2. – Электроника. – 240 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.



# ЛИНЕЙНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

## 1. Цель работы

Изучение принципа работы стабилизаторов напряжения с линейным (непрерывным) режимом управления; исследование схемы стабилизатора с транзисторным усилителем и с защитой от перегрузки.

## 2. Основные положения

Стабилизаторы напряжения вырабатывают заданные напряжения для электропитания электронных устройств при изменениях входного напряжения (от первичного источника) и тока нагрузки.

Важнейшими параметрами стабилизатора напряжения являются коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ , выходное сопротивление  $R_{вых}$  и коэффициент полезного действия  $\eta$ . Коэффициент стабилизации определяют из выражения

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_{1,ном}}}{\frac{\Delta U_2}{U_{2,ном}}} = \frac{U_{2,ном}}{U_{1,ном}} \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}, \quad (1)$$

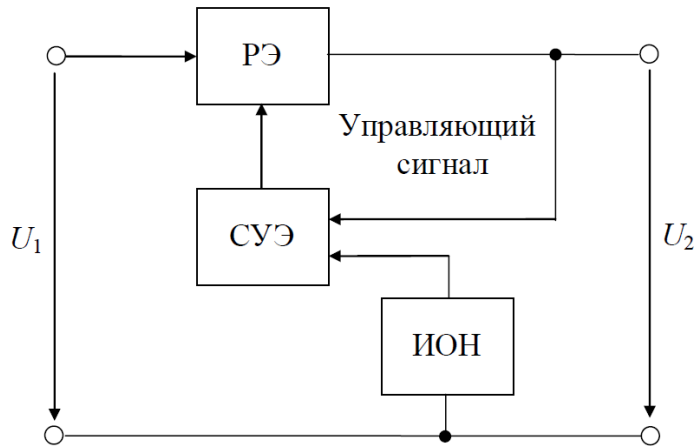
где  $U_{1,ном}$ ,  $U_{2,ном}$  – номинальные значения напряжения соответственно на входе и выходе стабилизатора;  $\Delta U_1$  – изменение входного напряжения;  $\Delta U_2$  – изменение напряжения на выходе при постоянном токе нагрузки. Таким образом, коэффициент стабилизации – это отношение относительного изменения напряжения на входе к соответствующему относительному изменению напряжения на выходе стабилизатора. Чем больше коэффициент стабилизации, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении входного. У простейших стабилизаторов величина составляет единицы, а у более сложных — сотни и тысячи.

Выходное сопротивление стабилизатора определяется выражением

$$R_{вых} = \left| \frac{\Delta U_2}{\Delta I_n} \right|, \quad (2)$$

где  $\Delta U_2$  – изменение постоянного напряжения на выходе стабилизатора при изменении тока нагрузки на  $\Delta I_n$  и неизменном напряжении на входе. Чем меньше выходное сопротивление, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении тока нагрузки. У простейших стабилизаторов величина  $R_{вых}$  составляет единицы Ом, а у более совершенных — сотые и тысячные доли Ома. Необходимо отметить, что стабилизатор напряжения обычно резко уменьшает пульсации напряжения.

**Компенсационные стабилизаторы** представляют собой замкнутые системы автоматического регулирования. На рисунке 1 представлена структурная схема стабилизатора напряжения компенсационного типа. Характерными элементами компенсационного стабилизатора являются источник опорного (эталонного) напряжения (ИОН), сравнивающий и усиливающий элемент (СУЭ) и регулирующий элемент (РЭ). Напряжение на выходе стабилизатора или некоторая часть этого напряжения постоянно сравнивается с эталонным напряжением. В зависимости от их соотношения сравнивающим и усиливающим элементом вырабатывается управляющий сигнал для регулирующего элемента, изменяющий его режим работы таким образом, чтобы напряжение на выходе стабилизатора оставалось практически постоянным.



В качестве ИОН обычно используют электронную цепь на основе стабилитрона, в качестве СУЭ часто используют дифференциальный, в частности, операционный усилитель, а в качестве РЭ — биполярный или полевой транзистор. Чаще всего регулирующий элемент включают последовательно с нагрузкой. В этом случае стабилизатор называют последовательным. Стабилизатор компенсационного типа содержит регулирующий элемент (обычно это так называемый "проходной" транзистор), который управляется схемой, состоящей из источника опорного напряжения, схемы сравнения и усилителя разности выходного и опорного напряжений. В стабилизаторах с непрерывным регулированием (линейных стабилизаторах) проходной транзистор работает в линейной области.

На рис.2 приведена схема стабилизатора с проходным транзистором  $VT1$  и дифференциальным усилителем на транзисторах  $VT2$  и  $VT3$ . Этот каскад выполняет функции и схемы сравнения, и усилителя разности напряжений. На один вход (базу  $VT2$ ) подается опорное напряжение  $U_{оп}$ , а на другой вход (базу  $VT3$ ) — через резисторный делитель  $R_{д1}, R_{д2}$  часть выходного напряжения  $U_2$ . Опорное напряжение равно напряжению  $U_{ст}$  на стабилитроне  $VD1$ .

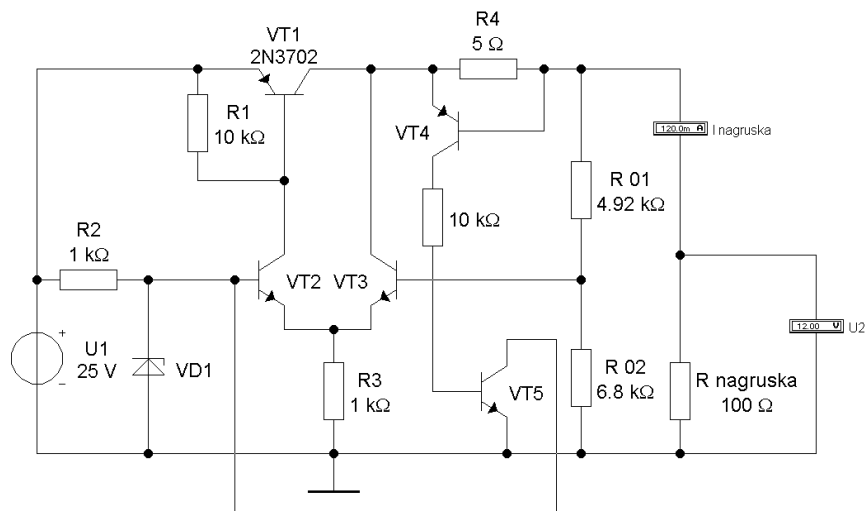


Рис.2. Схема стабилизатора напряжения

Схема защиты от перегрузки и короткого замыкания в нагрузке построена на транзисторах  $VT4$  и  $VT5$ .

Коллекторный ток проходного транзистора  $VT1$  управляется током коллектора транзистора  $VT2$ . При номинальном входном напряжении  $U_{ном}$  и номинальном токе нагрузки  $I_{ном}$  должен быть запас и для увеличения, и для уменьшения коллекторного тока  $VT1$ .

Когда выходное напряжение опускается ниже заданного уровня, происходит подзапирание транзистора  $VT3$ , при этом токи транзисторов  $VT2$  и  $VT1$  увеличиваются, и

происходит компенсация понижения напряжения  $U_2$ . Аналогично схема реагирует на повышение напряжения  $U_2$ .

Цепь отрицательной обратной связи поддерживает равенство потенциалов баз транзисторов  $VT3$  и  $VT2$ :

$$\frac{R_{д2}U_2}{R_{д1} + R_{д2}} = U_{ст}. \quad (3)$$

Поэтому выходное напряжение стабилизатора удерживается около значения, равного

$$U_2 = \frac{R_{д1} + R_{д2}}{R_{д2}} U_{ст}. \quad (4)$$

При допустимом выходном токе падение напряжения на резисторе  $R4$  составляет около 0,4 В, что недостаточно для отпирания транзистора  $VT4$ , он закрыт, а вместе с ним закрыт и транзистор  $VT5$ . При перегрузке, т. е. возрастании тока в цепи нагрузки сверх допустимого значения, напряжение на резисторе  $R4$  увеличивается, и когда оно достигает значения 0,6...0,7 В, транзистор  $VT4$  открывается и отпирает транзистор  $VT5$ , который понижает напряжение на стабилитроне  $VD1$ . При этом стабилизатор выходит из режима стабилизации выходного напряжения и переходит в режим ограничения выходного тока, предохраняющий от выхода из строя проходного транзистора  $VT1$ .

### 3. Программа работы и методические указания

#### 1. Расчет и налаживание стабилизатора в номинальном режиме

Собрать на рабочем столе программы **Electronics Workbench** схему стабилизатора (рис. 2). Выбрать из библиотеки **motor\_1n** стабилитрон, у которого напряжение стабилизации  $U_{ст}$  (**Zener test voltage**) составляет около половины заданной величины выходного напряжения стабилизатора согласно таблице вариантов.

Таблица

Варианты задания

Вариант	$U_{1,ном}, В$	$U_{2,ном}, В$	$I_{н,ном}, мА$	Вариант	$U_{1,ном}, В$	$U_{2,ном}, В$	$I_{н,ном}, мА$
1	25	12	150	9	25	15	120
2	20	10	200	10	16	8	200
3	15	6	120	11	22	11	165
4	30	15	150	12	18	10	160
5	10	5	200	13	24	12	180
6	18	8	160	14	13	6	125
7	20	11	220	15	20	9	150
8	18	9	180	16	12	5	125

Рассчитать сопротивление балластного резистора  $R_2$  из условия, чтобы ток стабилитрона был равен 10 мА:

$$R_2 = (U_{1,ном} - U_{ст})/10, \text{ кОм}. \quad (5)$$

Определить величину тока базы проходного транзистора  $VT1$  при номинальном выходном токе  $I_{н,ном}$ , используя упрощенное уравнение тока коллектора  $I_{к1} = \beta_1 \cdot I_{б1}$ :

$$I_{б1} = \frac{I_{к1}}{\beta_1} = \frac{I_{н,ном}}{\beta_1}$$

и найти требуемое значение тока коллектора  $VT2$ :

$$I_{к2} = I_{б1} + 0,1 \text{ мА}.$$

Второе слагаемое (0,1 мА) соответствует утечке тока через резистор  $R_1$ , если его сопротивление установить равным 10 кОм.

Рассчитать сопротивление резистора  $R_3$  в эмиттерной цепи дифференциального каскада, при котором суммарный ток эмиттеров  $VT2$  и  $VT3$  будет вдвое больше, чем ток  $I_{к2}$ :

$$R_3 = \frac{U_{ст} - U_{бэ.о}}{2I_{к.2}}, \quad (6)$$

где  $U_{бэ.о} = 0,7$  В – напряжение на эмиттерном переходе транзистора VT2.

Рассчитать и установить сопротивление нагрузки  $R_n$ , которое обеспечивает номинальный ток  $I_{н.ном}$ .

Рассчитать и установить сопротивление ограничительного резистора  $R_4$ , на котором номинальный выходной ток  $I_{н.ном}$  создает падение напряжение 0,4 В.

Рассчитать сопротивления резисторного делителя  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , удовлетворяющие условию (3). При расчете можно использовать пропорцию:

$$\frac{R_{02}}{R_{01}} = \frac{U_{ст}}{U_{2.ном} - U_{ст}},$$

Для определенности принять ток делителя равным 1 мА. Тогда суммарное сопротивление  $R_{01} + R_{02} = U_{2.ном}$  (в килоомах), т. е.  $R_{02}$  равно  $U_{ст}$  (в килоомах), а  $R_{01}$  – равно  $(U_2 - U_{ст})$ .

Включить моделирование и уточнить значение сопротивления  $R_{01}$  или  $R_{02}$  так, чтобы значение выходного напряжения соответствовало заданному с точностью до единицы младшего разряда вольтметра.

### **2. Измерение коэффициента стабилизации**

Коэффициент стабилизации определяется при постоянном токе нагрузки. Установить на входе номинальное значение входного напряжения  $U_{1.ном}$  и номинальный выходной ток  $I_{н.ном}$ ; измерить выходное напряжение. Оно после выполнения п.1 должно оставаться равным  $U_{2.ном}$ . Изменить входное напряжение на 25% от номинального значения в любую сторону – повысить или понизить на величину  $\Delta U_1$ . Измерить выходное напряжение и определить его изменение  $\Delta U_2$ . Подставить результаты эксперимента в выражение (1) и вычислить коэффициента стабилизации  $K_{ст}$ . Повторить эксперимент при изменении входного напряжения в противоположном направлении.

### **3. Измерение выходного сопротивления стабилизатора**

Выходное сопротивление измеряется при неизменном входном напряжении. Установить на входе номинальное значение входного напряжения  $U_{1.ном}$  и номинальный выходной ток  $I_{н.ном}$ ; измерить выходное напряжение. Изменить в любом направлении – в сторону увеличения или уменьшения ток нагрузки приблизительно на 25 % относительно номинального значения, для чего необходимо рассчитать соответствующее сопротивление нагрузки. Зафиксировать, на сколько изменились ток нагрузки ( $\Delta I_n$ ) и выходное напряжение ( $\Delta U_2$ ). Подставить эти результаты в (2) и вычислить значение выходного сопротивления  $R_{вых}$ . Повторить эксперимент при изменении тока нагрузки в противоположном направлении.

### **4. Испытание схемы защиты от перегрузки**

Установить на входе номинальное значение входного напряжения  $U_{1.ном}$  и номинальный выходной ток  $I_{н.ном}$ ; измерить выходное напряжение. Оно должно быть равным  $U_{2.ном}$ . Уменьшить сопротивление нагрузки в 5 раз по сравнению с номинальным значением. Измерить и зафиксировать в отчете показания амперметра в цепи нагрузки и вольтметра выходного напряжения. Сделать выводы по итогам опыта.

### **4. Контрольные вопросы**

1. В чем заключается принцип работы линейного стабилизатора напряжения компенсационного типа?
2. Назовите основные узлы стабилизатора, их назначение и взаимодействие между собой.
3. Как изменяется режим регулирующего элемента при понижении и повышении выходного напряжения?

4. Как определяется коэффициент стабилизации? От каких параметров компонентов схемы зависит его величина?
5. Поясните физический смысл выходного сопротивления стабилизатора. Каким оно должно быть у высококачественного стабилизатора?
6. Каким нижним пределом ограничивается входное напряжение, при котором обеспечивается работоспособность стабилизатора?
7. Как можно оценить к.п.д. линейного стабилизатора напряжения?
8. По каким параметрам следует выбирать проходной транзистор?
9. Объясните назначение и принцип работы схемы защиты стабилизатора от перегрузки.

### **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) схему исследуемого стабилизатора напряжения;
- 4) программу работы;
- 5) результаты расчета компонентов схемы для номинального режима;
- 6) результаты измерений коэффициента стабилизации и выходного сопротивления.

### **Библиографический список**

1. Электротехника и электроника: Учебное пособие / В.М. Бобырь, В.И. Иванов, В.С. Титов, А.С. Ястребов. В 2 кн. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т. – 2009. Кн. 2. – Электроника. – 240 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.

# ИМПУЛЬСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

## 1. Цель работы

Изучение принципа работы стабилизаторов напряжения с импульсным (релейным) режимом управления; исследование схемы понижающего стабилизатора с ключевым режимом работы проходного транзистора.

## 2. Основные положения

Импульсные, или ключевые, источники электропитания в настоящее время получили распространение не меньше, чем линейные стабилизаторы напряжения. Их основными достоинствами являются: высокий коэффициент полезного действия, малые габариты и масса, высокая удельная мощность. Все перечисленные свойства эти источники питания получили благодаря применению ключевого режима работы силовых элементов. В ключевом режиме проходной транзистор большую часть времени находится в области насыщения или области отсечки, а зону активного (линейного) режима проходит с высокой скоростью за очень малое время переключения. При этом в области насыщения напряжение на транзисторе близко к нулю, а в режиме отсечки в транзисторе отсутствует ток, благодаря чему потери в транзисторе оказываются достаточно малыми. Все это приводит к тому, что средняя за период коммутации мощность, рассеиваемая в ключевом транзисторе, оказывается намного меньше, чем в линейном регуляторе. Малые потери в силовых ключах приводят к уменьшению или полному исключению охлаждающих радиаторов.

Улучшение массогабаритных характеристик источника питания обусловлено и тем, что из схемы источника питания исключается силовой трансформатор, работающий на частоте 50 Гц. Вместо него в схему вводится высокочастотный трансформатор или дроссель, габариты и масса которых намного меньше низкочастотного силового трансформатора. Однако в ряде случаев такие стабилизаторы являются источником импульсных помех, что снижает информационную надежность электронной аппаратуры.

По способу управления ключевые стабилизаторы подразделяются на импульсные и релейные. В импульсных стабилизаторах частота управляющих сигналов постоянна, задается внешним генератором, в процессе работы изменяется скважность. В релейных стабилизаторах напряжения управляющие сигналы формируются с помощью компаратора и зависят от выходного напряжения.

Схема понижающего релейного стабилизатора приведена на рисунке 1. В этой схеме используется накопительная индуктивность (дроссель)  $L1$ , включенная последовательно с нагрузкой. Для сглаживания пульсаций в нагрузке параллельно ей включен конденсатор фильтра  $C1$ . Проходной транзистор  $VT1$  включен между источником питания  $U_1$  и накопительной индуктивностью  $L1$ . Схема управления включает или выключает транзистор в зависимости от значения напряжения на нагрузке  $U_2$ .

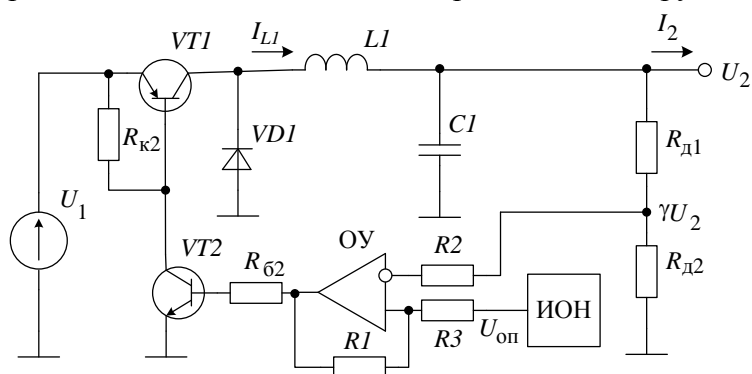


Рис. 1. Импульсный стабилизатор напряжения

Цикл работы стабилизатора поясняется временными диаграммами на рисунке 2. При отпирании транзистора  $VT1$  к дросселю приложена разность входного и выходного напряжений, ток индуктивности  $i_L$  в интервале времени  $T_1$  нарастает по линейному закону; при этом в дросселе запасается энергия. Когда ток  $i_L$  становится больше тока нагрузки  $I_n$ , конденсатор заряжается и напряжение  $u_C$  на выходе растет. В момент, когда выходное напряжение превысит заданное значение, равное

$$\frac{U_{on}}{\gamma} = U_{on} \frac{R_{д1} + R_{д2}}{R_{д2}},$$

срабатывает компаратор ОУ и запирает транзисторы  $VT2$  и  $VT1$ . К этому времени ток  $i_L$  достигает максимального значения  $I_{max}$ .

При размыкании транзисторного ключа  $VT1$  ток индуктивности  $i_L$  протекает через диод  $VD1$ , уменьшаясь по линейному закону под воздействием приложенного к дросселю напряжения  $U_2$ . Включение в схему диода  $VD1$  обеспечивает непрерывность тока в индуктивности  $L1$  и исключает появление опасных выбросов напряжения на транзисторе  $VT1$  в момент коммутации. За время  $T_2$  ток дросселя уменьшается от максимального значения  $I_{max}$  до минимального значения  $I_{min}$ . Ток дросселя отдает накопленную энергию в нагрузку. Когда ток  $i_L$  становится меньше тока нагрузки  $I_n$ , конденсатор разряжается и напряжение  $u_C$  на выходе уменьшается. В момент, когда выходное напряжение опустится ниже значения

$$\frac{U_{on}}{\gamma} = U_{on} \frac{R_1 + R_2}{R_2},$$

срабатывает компаратор ОУ и открывает транзисторы  $VT2$  и  $VT1$ .

Перепад тока от минимального до максимального значения называется амплитудой:  $I_{max} - I_{min} = I_m$ . Возможны два режима работы стабилизатора: режим непрерывного тока, когда  $I_m \leq 2I_n$ , и цикл в стационарном процессе состоит из двух интервалов  $T_1$  и  $T_2$ , и режим с прерыванием тока с амплитудой  $I_m > 2I_n$ , при этом рабочий цикл содержит, кроме интервалов  $T_1$  и  $T_2$ , и третий интервал времени  $T_3$ , на котором ток в дросселе равен нулю. В любом режиме среднее значение тока дросселя за период равно току нагрузки  $I_n$ .

Примем граничный режим стабилизатора с амплитудой  $I_m = 2I_n$ . В этом режиме  $I_{min} = 0$ ;  $I_{max} = I_m$ . Длительности интервалов  $T_1$  и  $T_2$  связаны между собой соотношениями:

$$I_m = \frac{(U_1 - U_2)T_1}{L} = \frac{U_2 T_2}{L} = 2I_n. \quad (1)$$

Отсюда можно найти период коммутации, установившийся в стационарных условиях при известных значениях входного напряжения и тока нагрузки:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{2LI_n U_1}{(U_1 - U_2)U_2}. \quad (2)$$

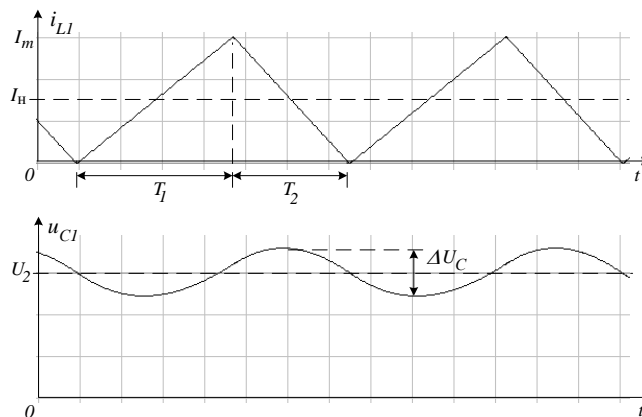


Рис. 2. Диаграммы тока дросселя и выходного напряжения в импульсном стабилизаторе

Диапазон пульсаций выходного напряжения при заряде и разряде конденсатора  $C1$  определяется его емкостью  $C$ , током нагрузки и периодом коммутации:

$$\Delta U_C = \frac{I_n T}{4C}. \quad (3)$$

При линейной форме тока форма напряжения на конденсаторе состоит из отрезков парабол, однако в первом приближении можно считать ее синусоидальной с амплитудой пульсаций

$$U_m = \frac{\Delta U_C}{2} = \frac{I_n T}{8C} = \frac{LI_n^2 U_1}{4C(U_1 - U_2)U_2}. \quad (4)$$

На самом деле, амплитуда пульсации будет больше указанной в (4) величины, так как пороги срабатывания и отпускания компаратора отличаются на  $\Delta U_{\text{пор}}$ :

$$U_m = \frac{\Delta U_C}{2} + \Delta U_{\text{пор}} = \frac{LI_n^2 U_1}{4C(U_1 - U_2)U_2} + \Delta U_{\text{пор}}. \quad (5)$$

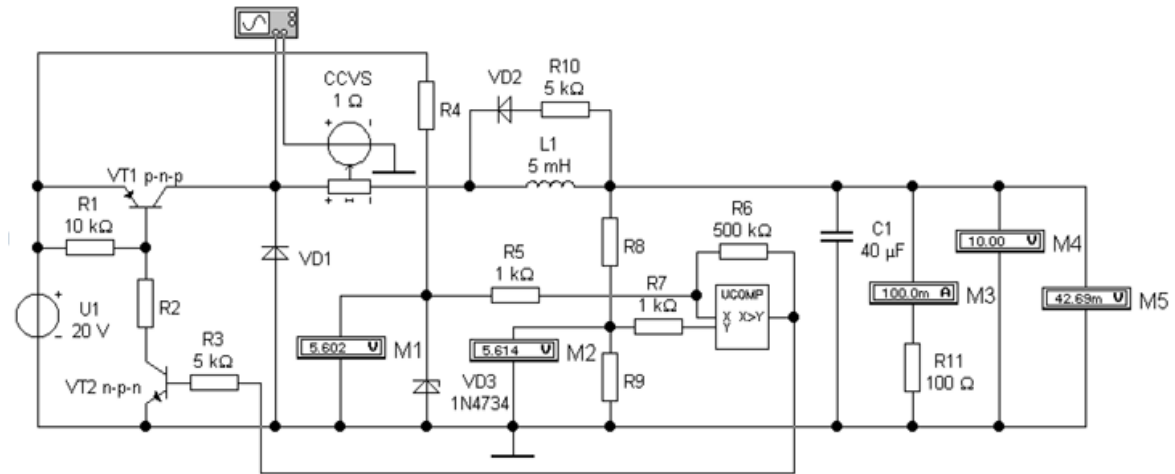


Рис.3. Схема установки для исследования импульсного стабилизатора напряжения

### 3. Программа работы и методические указания

#### 1. Расчет и налаживание стабилизатора в номинальном режиме

Собрать на рабочем столе программы **Electronics Workbench** схему стабилизатора (рис. 3).

Проходной транзистор  $VT1$  типа  $p-n-p$  из библиотеки **default** модель **ideal**, его коэффициент  $\beta_1 = 100$ , транзистор  $VT2$  типа  $n-p-n$  также из библиотеки **default** модель **ideal**, его коэффициент  $\beta_2 = 100$ . Маломощный транзистор  $VT2$  управляет мощным транзистором  $VT1$ , так как ток базы  $VT1$  – это ток коллектора  $VT2$ . Оба транзистора работают в режиме ключа: когда  $VT2$  закрыт, то и  $VT1$  выключен; если же  $VT2$  открыт до состояния насыщения, то при достаточном для насыщения токе базы и  $VT1$  будет включен и насыщен. Сопротивление  $R2$  ограничивает ток базы  $VT1$  на уровне, превышающем граничное значение при максимальном токе дросселя  $L1$ :

$$R_2 < \frac{(U_1 - U_{\text{бэ1}})\beta_1}{I_{\text{max}}}. \quad (5)$$

Варианты заданий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Варианты задания

Вариант	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_n$ , мА	$F$ , кГц	Вариант	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_n$ , мА	$F$ , кГц
1	25	12	150	5,0	9	25	15	120	4,0



Вариант	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_H$ , мА	$F$ , кГц	Вариант	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_H$ , мА	$F$ , кГц
2	20	10	100	4,0	10	16	8	150	3,0
3	18	8	120	4,5	11	25	11	90	5,0
4	30	15	75	6,0	12	22	10	110	6,0
5	15	6	150	5,5	13	25	12	90	5,5
6	22	12	80	3,3	14	30	13	75	6,3
7	25	13	90	4,8	15	20	9	120	4,5
8	20	9	120	5,3	16	30	15	70	6,7

Источник опорного напряжения  $U_{оп}$  построен на стабилитроне VD3. Выбрать из библиотеки **motor\_1n** стабилитрон, у которого напряжение стабилизации  $U_{ст}$  (**Zener test voltage**) составляет около половины заданной величины выходного напряжения стабилизатора согласно номеру варианта. В табл. 2 приводится список названий моделей стабилитронов и напряжений  $U_{ст}$ .

Таблица 2. Модели стабилитронов из библиотеки **motor\_1n**

Модель	$U_{ст}$ , В	Модель	$U_{ст}$ , В	Модель	$U_{ст}$ , В
1N4728A	3,3	1N4734A	5,6	1N4740A	10
1N4729A	3,6	1N4735A	6,2	1N4741A	11
1N4730A	3,9	1N4736A	6,8	1N4742A	12
1N4731A	4,3	1N4737A	7,5	1N4743A	13
1N4732A	4,7	1N4738A	8,2	1N4744A	15
1N4733A	5,1	1N4739A	9,1	1N4745A	16

Рассчитать сопротивление балластного резистора  $R_4$  из условия, чтобы ток стабилитрона был равен 10 мА:

$$R_4 = (U_1 - U_{ст})/10, \text{ кОм.} \quad (6)$$

Рассчитать сопротивления резисторного делителя  $R_8$  и  $R_9$ , удовлетворяющие условию:

$$\frac{R_9}{R_8} = \frac{U_{ст}}{U_2 - U_{ст}}. \quad (7)$$

Для определенности принимаем ток делителя равным 1 мА. Тогда суммарное сопротивление  $R_8 + R_9 = U_2$  (в килоомах), т. е.  $R_9$  равно  $U_{ст}$  (в килоомах), а  $R_8$  – равно  $(U_2 - U_{ст})$ .

Рассчитать и установить индуктивность дросселя, обеспечивающую заданную частоту коммутации  $F = 1/T$  (кГц) по формуле (1). Рекомендуется использовать следующие единицы измерения: период  $T$  – в мкс; ток  $I$  – в мА; индуктивность  $L$  – в мГн; напряжение  $U$  – в В.

Рассчитать и установить емкость конденсатора, обеспечивающую амплитуду пульсаций выходного напряжения, равную одному проценту от заданного значения  $U_2$ , по формуле (5).

Рассчитать и установить сопротивление нагрузки  $R_{11}$ , которое обеспечивает номинальный ток нагрузки  $I_H$ .

Установить в свойствах компаратора (модель **Comparator** из магазина **Analog ICs**) нулевое значение напряжения смещения (**Input Offset Voltage = 0**).

Для наблюдения на экране осциллографа временной диаграммы тока дросселя в схему на рис.3 включен преобразователь ток-напряжение (**Current-Controlled Voltage Source** – источник напряжения, управляемого током). Если сопротивление прямой передачи этого четырехполюсника равно одному Ому, то один миллиампер входного тока преобразуется в один милливольт выходного напряжения.

Параллельно дросселю включена цепочка VD2-R10 для гашения вспышки колебаний напряжения в колебательном контуре, образованном индуктивностью и межвитковой емкостью дросселя, возникающих в момент исчезновения тока в дросселе.

Включить моделирование и уточнить значение сопротивления  $R_8$  или  $R_9$  так, чтобы выходное напряжение соответствовало заданному значению с точностью до единицы младшего разряда вольтметра. Вольтметр M4 в режиме DC измеряет постоянную составляющую выходного напряжения, а вольтметр M5 в режиме AC – действующее напряжение пульсаций  $U_n$ , которое в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитуды пульсаций  $U_m$ . Сравнить полученное напряжение пульсаций с заданным значением.

Получить на экране осциллографа временные диаграммы тока дросселя и напряжения, скопировать эти изображения и поместить в отчете.

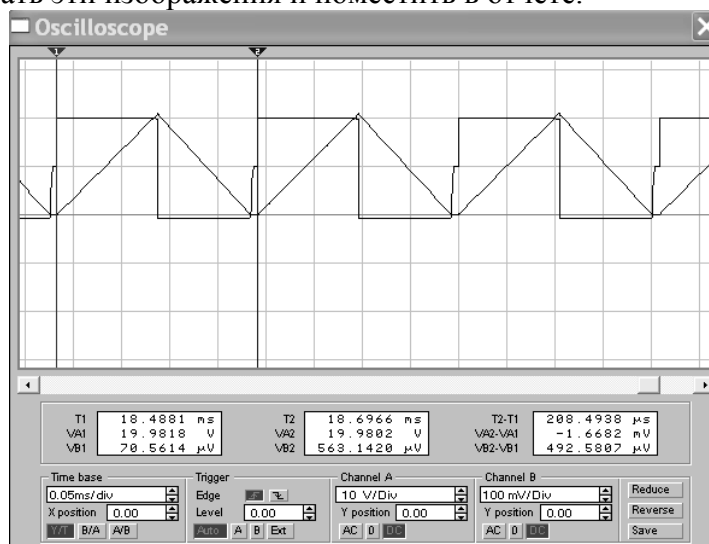


Рис. 4. Диаграммы напряжения на входе дросселя и тока дросселя при номинальном входном напряжении

## 2. Исследование временных диаграмм при изменениях входного напряжения

Установить на входе повышенное напряжение, на 25% выше номинального значения  $U_1$ , при номинальном выходном токе  $I_n$ . Измерить выходное напряжение и напряжение пульсаций. Получить на экране осциллографа временные диаграммы тока дросселя и напряжения, скопировать эти изображения и поместить в отчете. Отметить и объяснить изменения диаграмм и периода колебаний. На рисунке 5 приведен пример осциллограмм для схемы рис. 3.

Повторить эксперимент при уменьшении входного напряжения на 25% ниже номинального значения  $U_1$ , при номинальном выходном токе  $I_n$ . Измерить выходное напряжение и напряжение пульсаций. Получить на экране осциллографа временные диаграммы тока дросселя и напряжения, скопировать эти изображения и поместить в отчете. Отметить и объяснить изменения диаграмм и периода колебаний. На рисунке 6 приведен пример осциллограмм для схемы рис. 3.

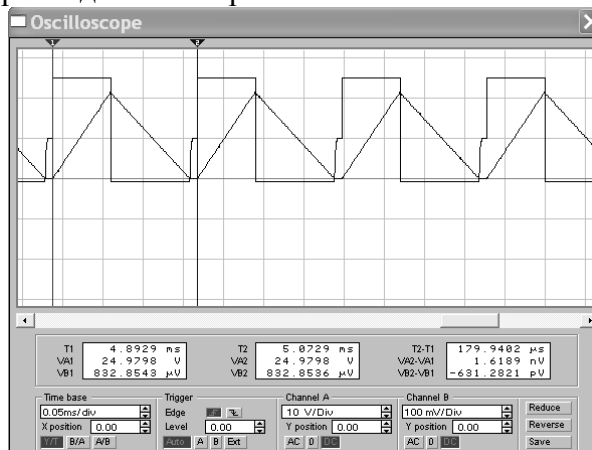


Рис. 5. Диаграммы напряжения на входе дросселя и тока дросселя при повышенном входном напряжении

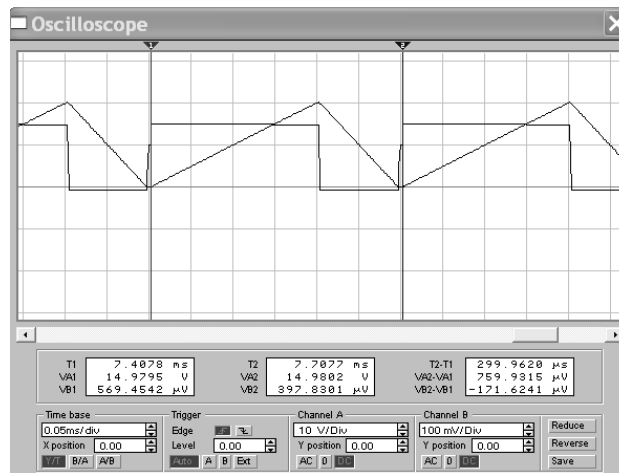


Рис. 6. Диаграммы напряжения на входе дросселя и тока дросселя при пониженном входном напряжении

### 3. Исследование временных диаграмм при изменениях тока нагрузки

Установить на входе номинальное напряжение  $U_1$  и уменьшить ток нагрузки на 25% от номинального значения  $I_n$ . Для этого необходимо увеличить сопротивление нагрузки в 1,33 раза. Измерить выходное напряжение и напряжение пульсаций. Получить на экране осциллографа временные диаграммы тока дросселя и напряжения, скопировать эти изображения и поместить в отчете. Отметить и объяснить изменения диаграмм и периода колебаний. На рисунке 7 приведен пример осциллограмм для схемы рис. 3.

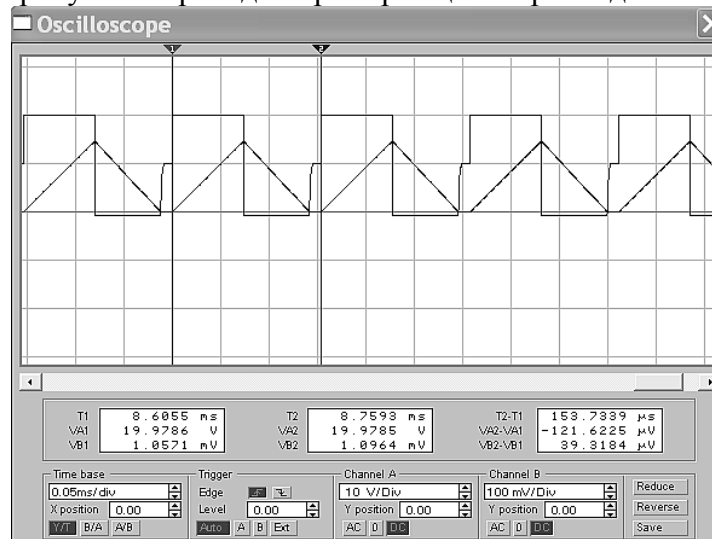


Рис. 7. Диаграммы напряжения на входе дросселя и тока дросселя при уменьшении тока нагрузки

Повторить эксперимент при изменении тока нагрузки в противоположном направлении: при номинальном входном напряжении  $U_1$  увеличить ток нагрузки на 25% от номинального значения  $I_n$ . Для этого необходимо уменьшить сопротивление нагрузки в 1,25 раза. Измерить выходное напряжение и напряжение пульсаций. Получить на экране осциллографа временные диаграммы тока дросселя и напряжения, скопировать эти изображения и поместить в отчете. Отметить и объяснить изменения диаграмм и периода колебаний. На рисунке 8 приведен пример осциллограмм для схемы рис. 3.

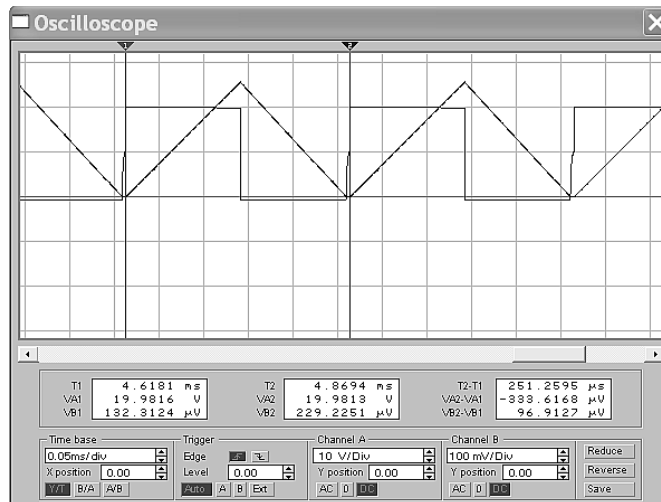


Рис. 8. Диаграммы напряжения на входе дросселя и тока дросселя при увеличении тока нагрузки

#### 4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип работы стабилизатора напряжения с «релейным» управлением?
2. Какие преимущества имеют импульсные понижающие стабилизаторы перед стабилизаторами компенсационного типа с непрерывным регулированием?
3. Чем объясняется высокий к.п.д. импульсных стабилизаторов?
4. Пояснить цикл работы релейного стабилизатора: процессы коммутации ключевого (проходного) транзистора, заряд и разряд дросселя и конденсатора фильтра.
5. Какую функцию выполняет разрядный диод?
6. От чего зависит скорость нарастания и спада тока в дросселе? Как связаны значения максимального тока дросселя и тока нагрузки?
7. Чем объясняются малые значения индуктивности дросселя и емкости конденсатора, а, следовательно, и габариты деталей импульсных стабилизаторов напряжения?
8. Как изменяются диаграммы тока дросселя и временные параметры стабилизатора при уменьшении или увеличении входного напряжения и тока нагрузки?
9. По каким параметрам следует выбирать проходной транзистор?

#### 5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) схему исследуемого стабилизатора напряжения;
- 4) программу работы;
- 5) результаты расчета компонентов схемы для номинального режима;
- 6) результаты измерений, временные диаграммы и их анализ.

#### Библиографический список

1. Электротехника и электроника: Учебное пособие / В.М. Бобырь, В.И. Иванов, В.С. Титов, А.С. Ястребов. В 2 кн. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т. – 2009. Кн. 2. – Электроника. – 240 с.
2. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.
3. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ТТЛ

## 1. Цель работы

Изучение базовой схемы элемента транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) и различных модификаций интегральных ТТЛ схем, измерение статистических и динамических параметров логического элемента ТТЛ.

## 2. Схемотехника интегральных схем ТТЛ и основные параметры и характеристики логического элемента

На рис. 1 приведена базовая схема логического элемента ТТЛ типа.

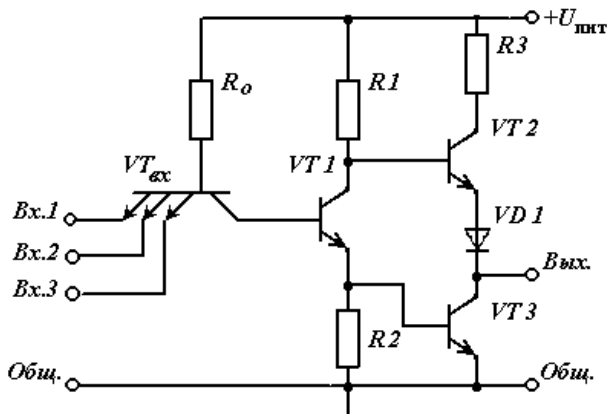


Рис. 1. Базовая схема логического элемента ТТЛ

Многоэмиттерный входной транзистор  $VT_{вх}$  эквивалентен группе обычных  $n-p-n$  транзисторов, у которых базы и коллекторы соответственно объединены, а эмиттеры используются независимо. Этот транзистор реализует логическую функцию И (конъюнкцию) входных переменных. Транзисторы  $VT1$ ,  $VT2$  и  $VT3$  работают как составной инвертор с низкоомным выходным сопротивлением.

Если на всех входах присутствуют сигналы высокого уровня  $U_{вх}^1$ , все эмиттерные переходы  $VT_{вх}$  заперты, и ток его базы течет через коллекторный переход в базу транзистора  $VT1$ , обеспечивая состояние насыщения транзисторов  $VT1$  и  $VT3$ . При этом транзистор  $VT2$  запирается низким потенциалом коллектора насыщенного транзистора  $VT1$  и на выходе формируется напряжение низкого уровня  $U_{вых}^0$ , соответствующее напряжению насыщения  $U_{кэ,нас}$  транзистора  $VT3$ . Диод  $VD1$  служит для надежного запираения транзистора  $VT2$ .

Если же хотя бы на одном из входов появится сигнал низкого уровня  $U_{вх}^0$ , входной транзистор  $VT_{вх}$  перейдет в состояние насыщения, и низкий потенциал коллектора  $VT_{вх}$  закроет транзисторы  $VT1$  и  $VT3$ . При этом с коллектора закрытого транзистора  $VT1$  через эмиттерный повторитель  $VT2$  и открытый диод  $VD1$  на выход поступит напряжение высокого уровня  $U_{вых}^1$ .

Таким образом, этот логический элемент реализует логическую функцию И-НЕ. Число входов определяется количеством эмиттеров транзистора  $VT_{вх}$  и может составлять от 2 до 8. Рассматриваемый трехвходовый элемент обозначается как 3И-НЕ (рис. 2).

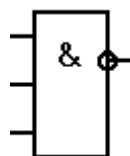


Рис. 2. Условное графическое обозначение элемента 3И-НЕ

Амплитудная передаточная характеристика  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  определяет формирующие свойства элемента, его помехоустойчивость, амплитуду и уровни сигнала. Вид характеристики может изменяться в определенных пределах в зависимости от разброса параметров схем, изменений напряжения питания, нагрузки, температуры окружающей среды. В статическом состоянии выходной сигнал элемента может находиться либо на верхнем ( $U_{\text{ВЫХ}}^1$ ), либо на нижнем ( $U_{\text{ВЫХ}}^0$ ) уровне напряжения.

Передаточную характеристику можно снять в статическом режиме, подавая на вход исследуемого элемента плавно изменяющееся напряжение и измеряя соответствующее выходное напряжение, либо в динамическом режиме, подавая на вход исследуемого элемента напряжение от генератора пилообразного напряжения и наблюдая передаточную характеристику на экране осциллографа.

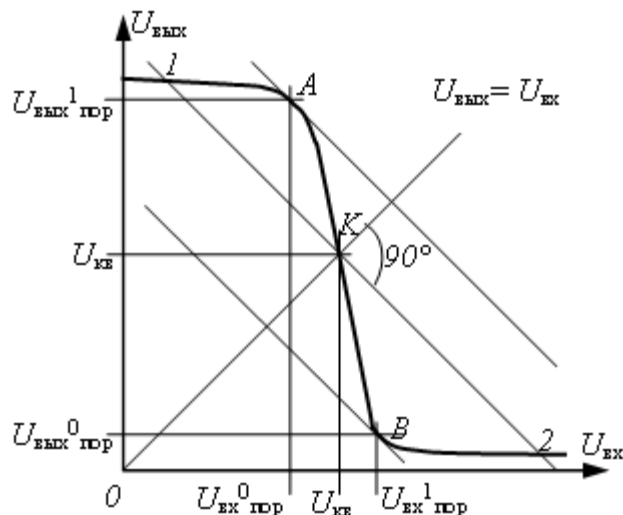


Рис. 3. Вид амплитудной передаточной характеристики инвертирующего логического элемента

На рис. 3 показана типичная передаточная характеристика инвертирующего логического элемента. Точка  $K$ , в которой  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$ , соответствует уровню квантования  $U_{\text{КВ}}$ . Если включить последовательно несколько элементов, имеющих такую характеристику, и подать на вход первого элемента сигнал, напряжение которого отличается от уровня  $U_{\text{КВ}}$ , то по мере прохождения сигнала по цепи элементов происходит “формирование” уровней логического нуля и логической единицы: рабочая точка асимптотически стремится к положению 1 или 2.

Точки  $A$  и  $B$ , в которых крутизна передаточной характеристики по модулю равна единице, ограничивают переходный участок характеристики. Этим точка соответствуют два пороговых уровня  $U_{\text{ВХ}}^0_{\text{ПОР}}$  и  $U_{\text{ВХ}}^1_{\text{ПОР}}$  для входного сигнала. Чем больше  $U_{\text{ВХ}}^0_{\text{ПОР}}$  и чем меньше  $U_{\text{ВХ}}^1_{\text{ПОР}}$ , тем круче переходный участок  $AB$ , тем идеальнее передаточная характеристика. В этом случае достигается высокая статическая помехоустойчивость элемента. Допустимые значения статической помехи на низком и высоком уровнях входного напряжения составляют соответственно:

$$U_{\text{ПОМ}}^0_{\text{МАХ}} = U_{\text{ВХ}}^0_{\text{ПОР}} - U_{\text{ВЫХ}}^0_{\text{ПОР}};$$

$$U_{\text{ПОМ}}^1_{\text{МАХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^1_{\text{ПОР}} - U_{\text{ВХ}}^1_{\text{ПОР}}.$$

Основными динамическими параметрами логического элемента являются задержка распространения сигнала  $t_{\text{ЗД.Р}}$  при переключении и длительности положительного  $t_{\text{ФР}}^{01}$  и отрицательного  $t_{\text{ФР}}^{10}$  фронтов выходного сигнала (рис. 4).

Задержки распространения сигналов при переходе выходного напряжения от «1» к «0»  $t_{\text{ЗД.Р}}^{10}$  и переходе выходного напряжения от «0» к «1»  $t_{\text{ЗД.Р}}^{01}$  определяются как интервал времени между фронтами входного и выходного сигнала элемента, измеренный, как правило, по уровням  $0,5(U_{\text{ВХ}}^0_{\text{ПОР}} + U_{\text{ВХ}}^1_{\text{ПОР}})$  и  $0,5(U_{\text{ВЫХ}}^0_{\text{ПОР}} + U_{\text{ВЫХ}}^1_{\text{ПОР}})$  соответственно. При

расчете задержки сигнала последовательно включенных элементов используется средняя задержка распространения  $t_{з.р.ср} = (t_{з.р}^{01} + t_{з.р}^{10})/2$ .

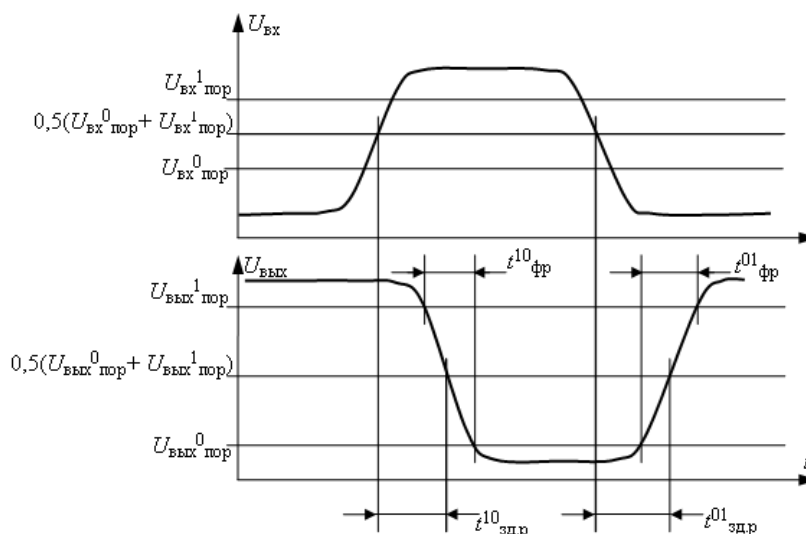


Рис. 4. Временные диаграммы входного и выходного напряжений

Длительность положительного и отрицательного фронтов измеряют по уровням 0,1 и 0,9 амплитуды выходного сигнала  $U_m = U_{вых}^1 - U_{вых}^0$ . Измерение времени задержки распространения и длительности фронтов производится с помощью осциллографа.

Схема логического элемента, приведенная на рис. 1, обладает рядом недостатков:

1. В диапазоне входного напряжения от 0,65 В до 1,3 В транзистор  $VT1$  уже открыт, а  $VT3$  еще закрыт, и соответствующий участок передаточной характеристики имеет малый наклон, что ухудшает пороговые и формирующие свойства элемента.

2. При переключениях элемента процесс рассасывания избыточного заряда в базах насыщенных транзисторов сильно увеличивает задержку распространения сигнала, особенно  $t_{з.р}^{01}$ .

На рис. 5 показана модифицированная схема элемента И–НЕ, которая применяется в современных интегральных схемах.

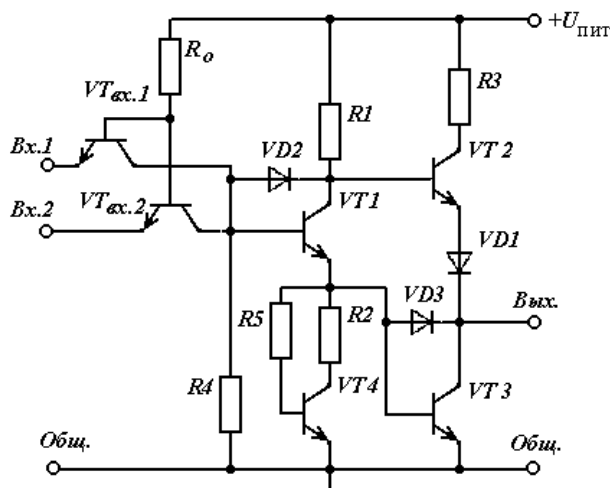


Рис. 5. Схема логического элемента 2И–НЕ

Для улучшения формы передаточной характеристики в эмиттерной цепи транзистора  $VT1$  вместо резистора установлена нелинейная цепь с транзистором  $VT4$ , которая ведет себя как динамическое сопротивление. В этой схеме транзистор  $VT1$  отпирается только тогда, когда откроются транзисторы  $VT4$  и  $VT3$ , то есть спад передаточной характеристики начинается при  $U_{вх} \approx 1,3$  В.

Для ускорения переключения транзисторов применяется ненасыщенный режим с использованием нелинейной обратной связи. С этой целью коллекторные переходы транзисторов  $VT1$  и  $VT3$  зашунтированы диодами  $VD2$  и  $VD3$ , имеющими низкое напряжение отпираания  $U_{д.пр} = 0,3...0,4$  В. В интегральных схемах используют диоды с барьером Шоттки (серии микросхем ТТЛШ).

### 3. Программа исследований

#### 1. Построение схемы логического элемента

Собрать на рабочем поле Electronics Workbench схему двухвходового логического элемента 2И–НЕ согласно рис. 5. В этой схеме входная цепь построена на нескольких входных транзисторах, так как в элементной базе программы Electronics Workbench отсутствует многоэмиттерный транзистор. В качестве входных транзисторов  $VT_{вх1}$  и  $VT_{вх2}$  и транзисторов  $VT1$ ,  $VT2$  и  $VT4$  необходимо выбрать модель 2N3394, а для транзистора  $VT3$  установить модель 2N2923 из библиотеки national2. В параметрах транзистора 2N2923 установить сопротивление коллектора (Collector ohmic resistance), равным 25 Ом. Диод  $VD1$  типа 1N4009 из библиотеки national, а диоды  $VD2$  и  $VD3$  – типа ВУМ 10-1000 из библиотеки general1. Установить номинальные значения сопротивлений резисторов согласно табл. 1.

Таблица 1

$R_0$	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	$R5$
2,8 кОм	0,8 кОм	250 Ом	130 Ом	10 кОм	0,5 кОм

Напряжение питания равно +5 В.

#### 2. Измерение передаточной характеристики

Собрать схему для построения передаточной характеристики в динамическом режиме по рис. 6. Схема логического элемента 2И–НЕ, собранного по рис. 5, на этом рисунке представлена условным обозначением.

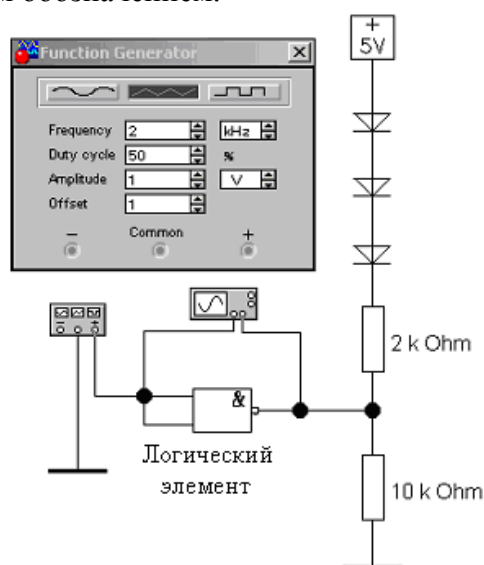


Рис. 6. Схема измерения передаточной характеристики

Функциональный генератор работает в режиме линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения. На один канал осциллографа подается входное напряжение, а на другой вход – выходное напряжение элемента. Для имитации нагрузки элемента к его выходу подключены резистор 10 кОм на общую шину и резистор 2 кОм через три диода на шину питания +5 В.

Режим работы осциллографа предварительно устанавливается Y/T (обычная развертка сигналов во времени). Сопоставляя временные диаграммы входного и выходного напряжений (рис. 7), построить график передаточной характеристики логического элемента.



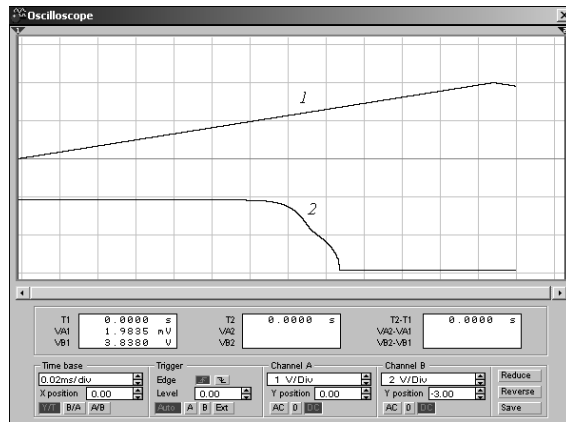


Рис. 7. Осциллограммы напряжений на входе (1) и выходе (2) логического элемента  
**3. Измерение динамических параметров**

Измерение динамических параметров элемента проводится с помощью генераторов  $G1$  и  $G2$ , задающих комбинации импульсов на входах элемента, и осциллографа, позволяющего визуально наблюдать формы входного и выходного сигналов и измерять их временные соотношения (рис. 8). Длительность импульсов генераторов выбирается соизмеримой, но большей, чем ожидаемое время задержки распространения (например для элемента ТТЛ не менее 100 нс).

Установить амплитуду импульсов на выходах генераторов  $G1$  и  $G2$ , равную 3 В. Интегрирующие цепи  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$  формируют реальные фронты входного сигнала.

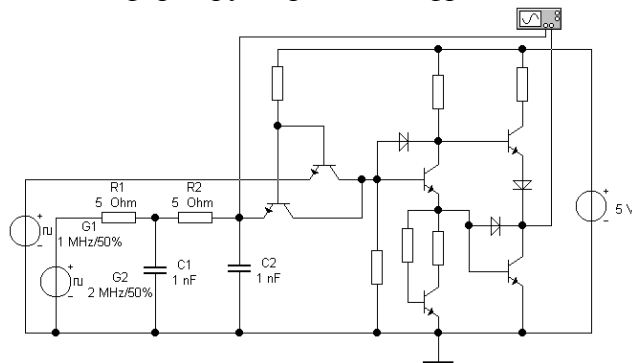


Рис. 8. Схема измерений динамических параметров

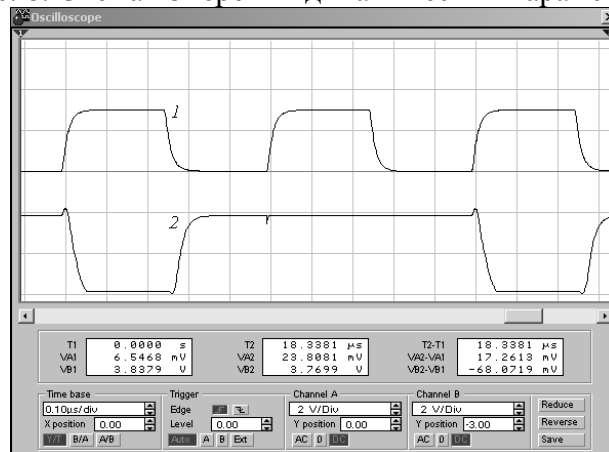


Рис. 9. Осциллограммы сигналов на входе (1) и выходе (2) логического элемента  
 Вход и выход исследуемого элемента подключаются к входам А и В осциллографа, режим работы которого предварительно устанавливается Y/T (обычная развертка сигналов во времени). Масштаб развертки по вертикальной оси задается органами управления осциллографа таким образом, чтобы наблюдаемые сигналы размещались в пределах экрана.

Измерение времени задержки распространения  $t_{зд,р}^{01}$  и  $t_{зд,р}^{10}$  и длительностей положительного  $t_{фр}^{01}$  и отрицательного  $t_{фр}^{10}$  фронтов выходного сигнала при переходе элемента из одного состояния в другое и при обратном переходе выполняется в соответствии с временными диаграммами, приведенными на рис. 9.

#### 4. Измерение выходной характеристики

Для измерения выходной характеристики используются схема рис. 10 с регулируемыми сопротивлениями нагрузки для низкого ( $R1$ ) и высокого уровня выходного напряжения ( $R2$ ).

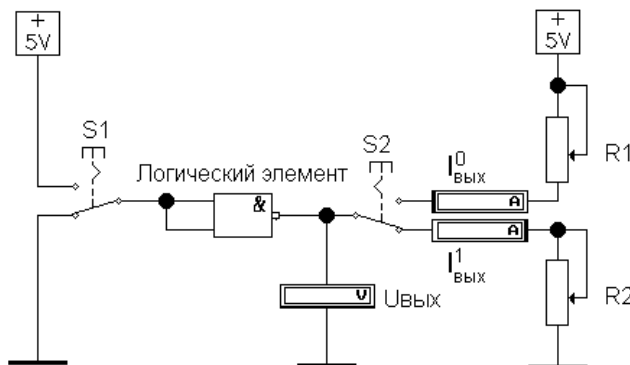


Рис. 10. Схема для измерений выходной характеристики

Ключи  $S1$  и  $S2$ , управляемые клавишей Space, служат для изменения состояния логического элемента. Для регулирования значения вытекающего выходного тока  $I_{ВЫХ}^0$  в диапазоне  $0...16$  мА и вытекающего выходного тока  $I_{ВЫХ}^1$  в диапазоне  $0...10$  мА необходимо изменять сопротивления нагрузки от  $10$  кОм до  $250$  Ом, фиксируя при этом значения выходного напряжения  $U_{ВЫХ}^0$  и  $U_{ВЫХ}^1$  соответственно.

Измеренные значения используются в последующем для построения графика выходной характеристики. Примерный вид выходной характеристики приведен на рис. 11.

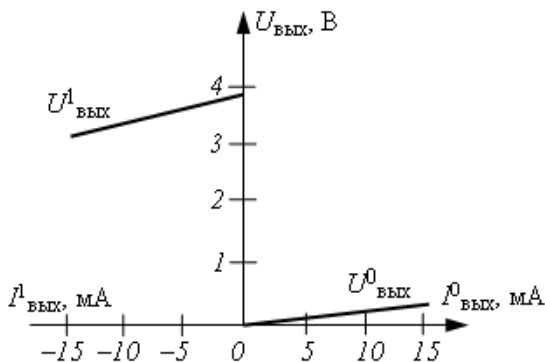


Рис. 11. Примерный вид выходной характеристики

Отметить на выходной характеристике допустимые значения тока нагрузки, при которых статические уровни выходного напряжения элемента обеспечивают предельные значения  $U_{ВЫХ}^0_{max} = 0,4$  В и  $U_{ВЫХ}^1_{min} = 2,7$  В.

#### 4. Контрольные вопросы

1. Какую логическую функцию выполняет многоэмиттерный транзистор в логическом элементе ТТЛ типа?
2. Какой эквивалентной схемой можно заменить многоэмиттерный транзистор?
3. Как формируются статические уровни напряжения  $U_{ВЫХ}^0$  и  $U_{ВЫХ}^1$  на выходе составного инвертора?
4. Каким требованиям должна удовлетворять форма амплитудной передаточной характеристики логического элемента?
5. Какие параметры характеризуют амплитудную передаточную характеристику?

6. Чем обусловлены задержки распространения сигнала при переключениях логического элемента?

7. Как измеряются длительности задержки распространения сигнала  $t_{здр}^{01}$  и  $t_{здр}^{10}$  и длительность фронтов  $t_{фр}^{01}$  и  $t_{фр}^{10}$  выходного сигнала?

8. Какие схемные решения используются для повышения быстродействия элементов ТТЛ типа?

9. Каким параметром характеризуется нагрузочная способность логического элемента? Чем она ограничена?

### **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) схему исследуемого логического элемента ТТЛ типа;
- 4) результаты измерения амплитудной передаточной характеристики: график и параметры характеристики;
- 5) результаты измерения динамических параметров элемента: временные диаграммы и длительности задержки сигнала и фронтов;
- 6) результаты измерения выходной характеристики: таблицы и график характеристики.

### **Библиографический список**

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: Учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 с.
2. Угрюмов Е.П. Проектирование элементов и узлов ЭВМ: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. – 318 с.
3. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчёт элементов цифровых устройств: Учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 526 с.
4. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы: Справочное пособие / Под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1984. – 432 с.