

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

А.К. Пронина

СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания
к практическим работам по дисциплине
для студентов специальности
26.05.07 - Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики
очной и заочной формы обучения

Часть 1

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 621.3(07)
М545

Р е ц е н з е н т:

С.А. Конева – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»,
канд. техн. наук, доцент

Пронина А.К.

П81 Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: методические указания к выполнению практических работ. Ч. 1 / А.К. Пронина ; Министерство науки и высшего образования РФ, Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 24 с. – Текст : электронный.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 — Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих практические работы по дисциплине «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника».

УДК 621.3(07)

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой «Судовое электрооборудование» Морского института в качестве методических указаний по дисциплине «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» для студентов специальности 26.05.07 — Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, протокол № 8 от 27 мая 2020 г.

© Пронина А.К., 2020
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Практическое занятие № 1. Транзисторные ключи	5
Практическое занятие № 2. Симметричной RS-триггер с внешним смещением	10
Практическое занятие № 3. Симметричный мультивибратор с общим эмиттером	15
Практическое занятие № 4. Однокаскадный усилитель на транзисторе с общим эмиттером	18
Практической задание № 5. Операционные усилители	22
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Практические работы по курсу «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» имеют целью закрепить теоретические знания по соответствующему курсу, развить у студентов навыки самостоятельных расчетов электронных устройств на полупроводниковых элементах, научить грамотно и целенаправленно проводить расчеты типовых электронных устройств, при этом знать принцип действия, технические характеристики и эксплуатационные свойства элементной базы устройств судовой электроники. А также использовать полученные расчетные данные для построения работоспособных электронных узлов и блоков систем электроники.

В результате освоения дисциплины СЭиСПТ обучающиеся по специальности «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» готовятся к решению инженерных задач и должны обладать профессиональными компетенциями (ПК), предусмотренными ФГОС ВО и конвенцией ПДНВ-95.

В процессе выполнения практических работ, являющихся важной составляющей для профессиональной подготовки судовых электромехаников в обеспечение раздела АИШ/6 Конвенции ПДНВ-95 (Функция – Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления), студент приобретает знания и умения, позволяющие овладеть элементами компетенций судовых электромехаников в сфере «Наблюдение за эксплуатацией электрических и электронных систем, а также систем управления», а именно: Знание основ электроники и силовой электроники (ПСК-4).

В рамках настоящего практического задания предусматривается формирование у студентов в соответствии с ФГОС следующих профессиональных компетенций: ПК-2 способностью и готовностью к самостоятельному обучению в новых условиях производственной деятельности с умением установления приоритетов для достижения цели в разумное время; ПК-9 способностью и готовностью осуществлять выбор электрооборудования и элементов систем автоматики для замены в процессе эксплуатации судового оборудования.

Практические работы выполняются самостоятельно и за отчетный период производится сдача работ. При выполнении практической работы студентам необходимо проработать теоретический материал, написать: тему работы; изобразить электронную схему устройства с описанием работы; произвести расчет, согласно полученного варианта, используя исходные данные; ответить письменно на контрольные вопросы.

К сдаче представляется отчет, содержащий стандартный титульный лист, номер и тема практического задания, вопросы задания, схема электронного устройства с описанием принципа его работы, исходные данные, согласно варианта (списочный номер по журналу); ответы на контрольные вопросы.

Практическое занятие № 1

Тема: Транзисторные ключи

Задание.

1. Изобразить схему транзисторного ключа с общим эмиттером.
2. Охарактеризовать принцип работы: состояние транзистора в режимах: включен (ток насыщения); отключен (ток отсечки)
3. Рассчитать транзисторный ключ с ускоряющим конденсатором по исходным данным варианта задания
4. Ответить в письменной форме на контрольные вопросы

Общие сведения.

В качестве ключа используется транзистор: для пропускания тока в прямом направлении и для прерывания тока. Транзисторный ключ выполняет роль бесконтактного выключателя:

– Выключатель замкнут – транзистор открыт, его сопротивление $R_{np} = 0$, прямой ток через транзистор определяется напряжением питания E_k и сопротивлением нагрузки $R_{нз} = R_k$; $I_k = E_k / R_k$.

– Выключатель разомкнут – транзистор закрыт (заперт), его сопротивление $R_{np} \approx \infty$, прямой ток через транзистор $I_k = E_k / \infty \approx 0$.

Для открытия транзистора на управляющий переход «эмиттер-база» подается в прямом направлении, импульс отпирающего напряжения $U_{эб}$ (напряжение входа): $U_{эб} = U_{вх}$.

Транзистор пропускает через себя максимальный ток (ток насыщения). В режиме насыщения эмиттерный и коллекторный переходы смещены в прямом направлении (открыты), поэтому отпирающий импульс может быть снят. Ток базы

$$I_{\bar{б}} \geq \frac{I_{кн}}{\beta}$$

где $I_{кн}$ – прямой ток, ток насыщения; β – коэффициент усиления по току (20-80).

Таким образом, после открытия транзистора и пребывания его в насыщенном состоянии, импульс управления может быть снят.

Для закрытия транзистора, то есть в непроводящее состояние по цепи «эмиттер-коллектор-нагрузка» (в режим отсечки) на вход транзистора подается запирающий импульс в виде напряжения $U_{\bar{бэ}} \geq 0$, где $U_{\bar{бэ}}$ – напряжение между базой и эмиттером (прямое напряжение: $U_{\bar{бэ}} < 0$). Это условие действует при указанной полярности источника напряжения E_k .

Прямой ток в закрытом состоянии транзистора не равен нулю, очень мал и называется током утечки.

Переходный режим ключа.

Переходный режим ключа возникает при включении и выключении ключа и определяет его быстродействие.

При подаче отпирающего входного импульса происходит заряд емкости перехода «эмиттер-база», вследствие чего ток базы I_b нарастает по экспоненте, что приводит к постепенному открытию транзистора. Режим насыщения наступает при некотором значении I_b , при котором коллекторный ток достигает тока насыщения и его рост прекращается. Аналогичный процесс происходит при запирании (закрытии) транзистора.

При формировании с помощью ключа прямоугольных импульсов высокой частоты время нарастания фронта и время спада (среза) импульса становится соизмеримо с длительностью самого импульса (рис. 1.1).

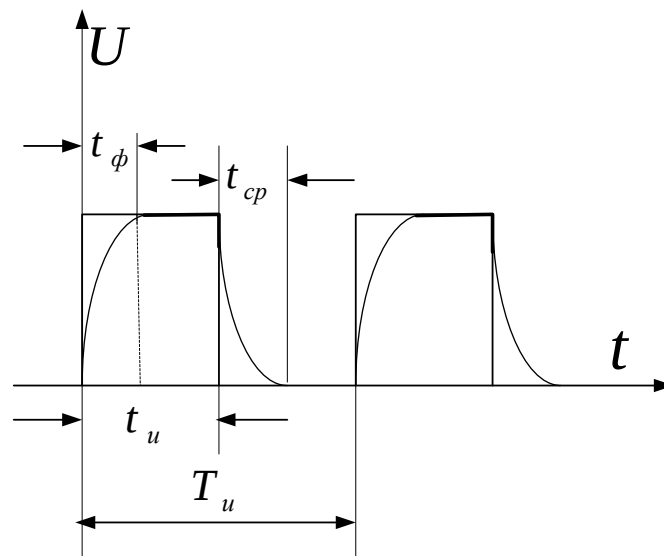


Рис. 1.1 t_ϕ – время формирования фронта импульса; t_{cp} – время формирования среза импульса; t_u – длительность импульса; T_u – период следования импульсов

Чтобы импульсы, формируемые с помощью включения и отключения, приближались к прямоугольным, необходимо уменьшить время t_ϕ , t_{cp} . Это делается за счет включения ускоряющего конденсатора C параллельно сопротивлению R_b .

Исходные данные:

- амплитуда выходного импульса U_m (15 – 25) В;
- длительность фронта импульса t_ϕ (1,0 – 2,0) мкс;
- диапазон температур окружающей среды 20...50°C.

Для ключа выбираем условия транзистор с параметрами:

- $\beta = 20 \dots 80$ – коэффициент усиления из формулы $I_\kappa = \beta I_b$;
- $U_{\kappa \text{ доп}} = 30 \text{ В}$ – максимально допустимый скачек напряжения на коллекторе в переходном процессе включения (замыкания ключа);
- $f_a = 0.5 \dots 1.5 \text{ МГц}$ – верхний предел частотного диапазона, определяемый скоростью нарастания фронта импульса;

- $I_{ко max} = 100 - 200 \text{ мкА}$ – максимальный ток коллектора при закрытом транзисторе (ток отсечки);
- $I_{кн} = 150 - 300 \text{ мкА}$ – ток коллектора насыщения транзистора.

Таблица вариантов.

№ варианта	U_m (В)	t_{ϕ} (мкс)	β
1.	15	1,0	20
2.	16	1,1	30
3.	17	1,15	40
4.	18	1,2	50
5.	19	1,25	60
6.	20	1,3	70
7.	21	1,35	60
8.	22	1,4	50
9.	23	1,45	40
10.	24	1,5	30
11.	25	1,55	20
12.	26	1,6	25
13.	27	1,7	35
14.	26	1,8	45
15.	25	1,9	55
16.	24	1,0	65
17.	23	1,1	75
18.	22	1,15	80
19.	23	1,2	90
20.	34	1,25	40

Пример расчета.

Рассчитать транзисторный ключ при следующих исходных данных: амплитуда выходного импульса $U_m = 20 \text{ В}$, длительность фронта импульса $t_{\phi} = 1,5 \text{ мкс}$, диапазон температур окружающей среды $20 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

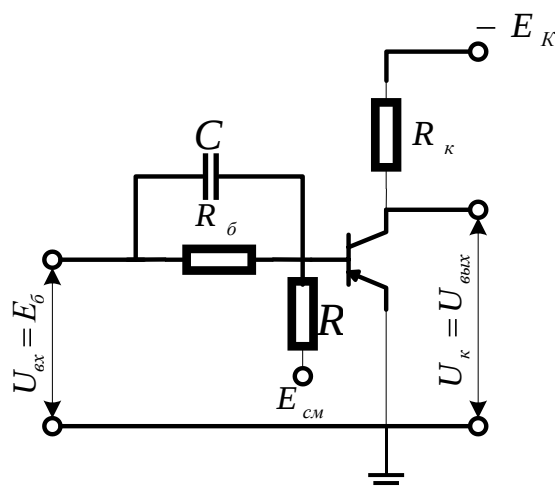


Рис. 1.2. Транзисторный ключ с ускоряющим конденсатором

Выберем ключ с ускоряющим конденсатором, так как требуемая длительность фронта импульса сравнительно мала.

Напряжение источника питания

$$E_k = (1,1 \dots 1,2) U_m = 1,1 \cdot 20 = 22 В$$

Выбираем транзистор из условий

$$f_a \geq \frac{1}{2\pi t_{\phi}} = \frac{1}{6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 105 \text{ кГц};$$

$$U_{к.дон} \geq E_k = 22 В.$$

Согласно этим данным выбираем транзистор МП21Г с параметрами $\beta = 20 \dots 80, U_{к.дон} = 30 В, f_a = 1 МГц, I_{к0 max} = 200 \text{ мкА}, I_{к.дон} = 300 \text{ мА}.$

Выбираем ток коллектора насыщения транзистора $I_{кн}$. При большом $I_{кн}$ сопротивление резистора R_k получается малым и улучшается температурная стабильность ключа, а также согласно выражению эквивалентной постоянной времени переходного процесса, повышается быстродействие:

$$\tau_{\beta экв} = \tau_{\beta} + k\beta C_k R_k + C_n R_k$$

где k - коэффициент, зависящий от степени насыщения s , и при $s = 1,2 \dots 3$, приближенно равен $1,6 \dots 1,3$. C_k, C_n - емкости коллектора транзистора.

Из формулы видно, что для увеличения быстродействия транзисторного ключа следует уменьшить сопротивление резистора R_k .

Однако в области больших токов уменьшается β . Во всех случаях должно выполняться неравенство $I_{кн} < I_{к.дон}$. Принимаем $I_{кн} = 25 \text{ мА}$. При этом $\beta = 20$. Определяем сопротивление резистора в коллекторной цепи

$$R_k = \frac{E_k}{I_{кн}} = \frac{22}{25 \cdot 10^{-3}} = 880 \text{ Ом}$$

Принимаем $R_k = 1 \text{ кОм}$.

Рассчитаем входную (базовую) цепь ключа.

Источник запирающего положительного смещения $E_{см}$ может быть отдельным, (рис.) совмещен с источником управляющего напряжения $U_{вх}$

Находим положительное напряжение смещения

$$E_{см} \approx 0,2 E_k = 0,2 \cdot 20 = 4,4 В$$

Принимаем $E_{см} = 4 В$

Определяем R_{δ}

$$R_{\delta} \leq \frac{E_{\delta}}{I_{к0 max}} = \frac{4}{200 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ кОм}$$

Принимаем $R_{\delta} = 18 \text{ кОм}$

Емкость ускоряющего конденсатора

$$C = \frac{\tau_{\beta}}{R_{\delta}} = \frac{\beta}{2\pi f_a R_{\delta}} = \frac{20}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 18 \cdot 10^3} = 177 \text{ пФ}$$

Принимаем $C = 180 \text{ пФ}$.

Контрольные вопросы.

1. Характеристики реального импульса; дать определения: высота импульса, фронт импульса, срез импульса, период следования импульсов, частота следования импульсов.
2. В каких двух состояниях находится транзистор в режиме ключа. Дать определения с использованием выходной характеристики транзистора.
3. Дать определение коэффициента усиления: формула, с расшифровкой параметров
4. Что предусматривается в схеме транзисторного ключа, чтобы приблизить импульсы к идеальной (прямоугольной) форме.

Практическое занятие № 2

Тема: Симметричный RS-триггер с внешним смещением

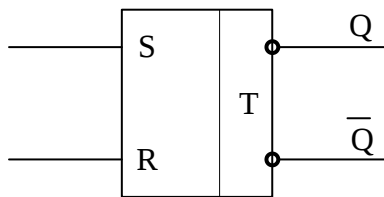
Задание.

1. Знать условные обозначения – RS-, T-, D-триггеров.
2. Изобразить схему и объяснить работу транзисторного симметричного RS-триггера с внешним смещением.
3. Рассчитать транзисторный симметричный триггер с общим входом.
4. Ответить на контрольные вопросы (письменно).

Общие сведения.

Триггер – электронное запоминающее устройство, имеющее два устойчивых состояния, одно из которых считается единичным, а другое – нулевым. Устройство имеет два входа и два выхода, входы и выходы – информационные (1 или 0). Используется в вычислительной технике для хранения и обработки сигналов с целью выполнения математических операций.

Условное изображение RS-триггера имеет вид:



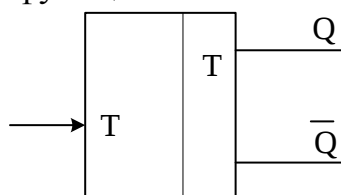
Входы S R, на которые подаются запускающие импульсы, служат для установки триггера в состояние устойчивого равновесия («1» или «0» на входе).

Сигнал «1» поступающий на вход S устанавливает триггер в состояние «1», при котором с прямого выхода Q снимается сигнал «1», а с инверсного выхода $\bar{Q}$ (не Q) – снимается сигнал «0».

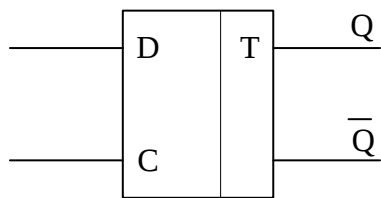
Сигнал, поступающий на вход R, устанавливает триггер в состояние «0» на прямом выходе, а на инверсном – «1». Одновременная подача сигналов «1» на оба входа – запрещена.

После подачи управляющего сигнала состояние выходов не меняется, даже если на входе сигналы отсутствуют.

Более сложные функции выполняют T-триггеры и D –триггеры. Они комбинируются из нескольких RS- триггеров, но обозначаются на схеме в виде одного функционального элемента.



T-триггер с одним входом. При каждом поступающим на вход сигналом состояние выходов меняется на противоположное ($Q=1 \bar{Q}=0$); ($Q=0 \bar{Q}=1$)



D-триггер с синхронизирующим входом С. Для записи сигнала на выходе «1», на входе вместе с сигналом «1» на D должен поступать сигнал (или уже быть) на входе С

Схема RS-триггера на двух транзисторах со смещением представляет собой два закольцованных ключа. Выход одного ключа замкнут на вход другого и наоборот. Так как оба ключа (каскада) выполнены по идентичным (одинаковым) схемам и на идентичных элементах, то такой триггер называется *симметричным триггером*.

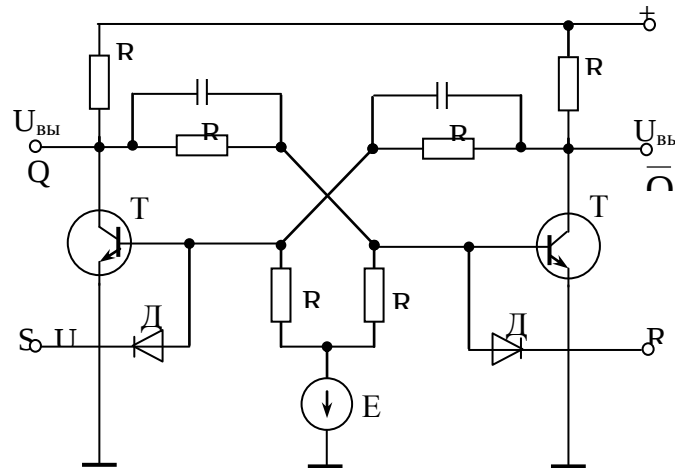


Рис. 2.1. Схема симметричного RS-триггера с внешним смещением

На рис. 2.1 приведена схема RS-триггера с коллекторно-базовыми связями, построенная на транзисторах типа *n-p-n*. Схема состоит из двух одинаковых ключей на транзисторах T1 и T2, охваченных перекрестно обратными связями: выход ключа на транзисторе T1 соединен со входом ключа на транзисторе T2, а выход T2 с входом T1. Входные сигналы подаются через диоды Д1 и Д2 на базы транзисторов T1 и T2.

Схема может находиться в одном из двух устойчивых состояний: либо T1 открыт, а T2 закрыт, либо T1 закрыт, а T2 открыт. Другие состояния, например, когда открыты оба транзистора, являются неустойчивыми.

Предположим, что транзисторы T1 и T2 открыты и в цепях их баз, коллекторов и эмиттеров протекают одинаковые токи (параметры схемы выбираются симметрично одинаковыми). Пусть по каким-то причинам напряжение на базе транзистора T1 уменьшилось. Это приведет к уменьшению базового и, следовательно, коллекторного тока транзистора T1. Напряжение на коллекторе T1 $U_{\text{вых1}}$ возрастет, что приведет к увеличению тока базы и, следовательно, коллекторного тока второго транзистора T2. Уменьшение напряжения на коллекторе T2 будет способствовать дальнейшему уменьшению тока транзистора T1. Благодаря положительной обратной связи через резисторы в триггере развивается лавинообразный процесс, который прерывается из-за насыщения одного транзистора (в нашем случае T2) и перехода другого транзистора (T1) в режим отсечки. Для

придания устойчивости любому из двух состояний в цепь базы транзисторов включают источник ЭДС смещения E_6 , который создает на базе закрытого транзистора обратное, запирающее напряжение.

Для переброски триггера в другое устойчивое положение на базу (вход) закрытого транзистора, например, Т1 подается сигнал в виде импульса напряжения, превышающего напряжение смещения и имеющего противоположную полярность. Это приводит к тому, что транзистор Т1 приоткрывается, в цепи коллектора Т1 появится ток, а потенциал его коллектора упадет. Это вызовет уменьшение базового тока транзистора Т2 и его закрытие. Далее процесс будет развиваться лавинообразно и закончится полным открытием Т1 и закрытием Т2. Для обратного перехода сигнал управления подается на базу (вход) транзистора Т2.

Исходные данные.

- амплитуда выходного импульса U_m (5 – 10) В;
- частота повторения запускающих импульсов $F_{max} = 200\text{--}650 \text{ кГц}$;
- диапазон температур окружающей среды 20...50 °С;
- коэффициент усиления из формулы $\beta = 20 \dots 80$;
- транзисторы выбираем из справочника (Справочник: полупроводниковые приборы: транзисторы. Под редакцией Н.Н. Горюнова.

Таблица вариантов.

№ варианта	U_m (В)	F_{max} (кГц)	β
1	5	300	20
2	6	250	30
3	7	400	45
4	8	450	50
5	9	500	60
6	10	600	70
7	9	500	65
8	8	400	80
9	7	350	40
10	5	300	75
11	5	200	20
12	6	350	25
13	6,5	300	35
14	7,5	320	45
15	8	355	85
16	10	400	75
17	9	500	75
18	8	650	70

Пример расчета.

Рассчитать транзисторный симметричный триггер с общим входом при следующих исходных данных: амплитуда выходных импульсов $U_m = 5\text{В}$,

частота повторения запускающих импульсов $F_{max} = 300 \text{ кГц}$, максимальная температура окружающей среды 50°C .

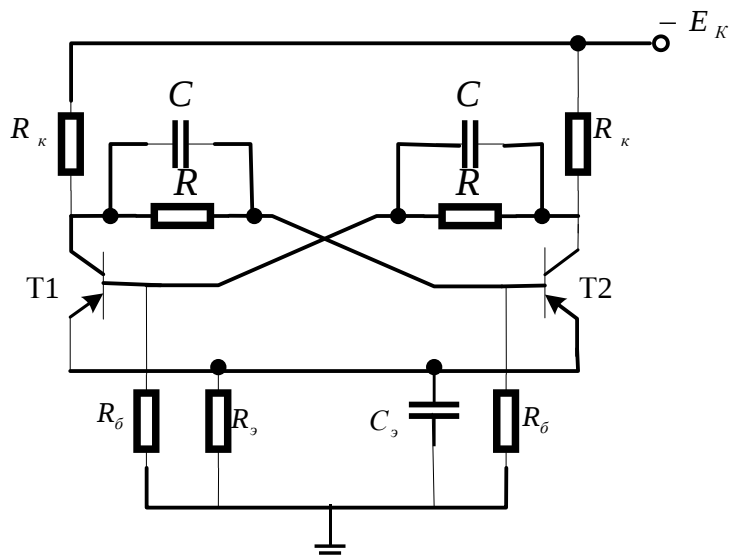


Рис. 2.2. Схема симметричного триггера

Напряжение источника питания

$$E_{\kappa} = (1,1 \dots 1,2)U_m = 1,1 \cdot 5 = 6\text{В}$$

Выбираем транзистор из условий

$$U_{\kappa, \text{дон}} \geq E_{\kappa} = 6\text{В}.$$

И согласно формуле $F_{max} \approx 0,7f_a$

$$f_a \geq F_{max} / 0,7 = \frac{300 \cdot 10^3}{0,7} = 430 \text{ кГц}$$

Этим условиям удовлетворяет транзистор ГТ108Б с параметрами

$$U_{\kappa, \text{дон}} = 10\text{В}, \quad I_{\kappa, \text{дон}} = 50 \text{ мА}, \quad f_a = 1 \text{ МГц},$$

$$\beta = 35 \dots 80, \quad I_{\kappa 0 \text{ max}} = 200 \text{ мкА}.$$

Расчет сопротивлений резисторов R_{κ} аналогичен расчету ключа.

Выбираем $I_{\kappa \text{ н}} = 10 \text{ мА} < I_{\kappa, \text{дон}} = 50 \text{ мА}$. Тогда

$$R_{\kappa} = \frac{E_{\kappa}}{I_{\kappa \text{ н}}} = \frac{6}{10 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Ом}$$

Принимаем $R_{\kappa} = 1 \text{ кОм}$. Выбираем напряжение источника

положительного смещения $E_{\delta} = 2\text{В}$

Емкость ускоряющего конденсатора

$$C = \frac{1,5}{2\pi f_a R_{\kappa}} = \frac{20}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^3} = 240 \text{ пФ}$$

Принимаем $C = 240 \text{ пФ}$

Определяем сопротивление резистора

$$R_{\delta} \leq \frac{E_{\delta}}{I_{\kappa 0 \text{ max}}} = \frac{2}{200 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ кОм}$$

При расчете необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$R_{\delta} \leq \frac{1}{(2 \dots 3)CF_{max}} = \frac{1}{3 \cdot 240 \cdot 10^{-12} \cdot 300 \cdot 10^3} = 4,6 \text{ пФ}$$

Принимаем $R_{\bar{e}} = 4,3 \text{ кОм}$

Находим сопротивление резистора связи:

$$R \leq R_{\kappa} \left(\frac{\beta}{1 + \beta \frac{E_{\bar{e}} R_{\kappa}}{E_{\kappa} R_{\bar{e}}}} - 1 \right) = 1 \cdot 10^3 \left(\frac{35}{1 + 35 \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^3}{6 \cdot 4,3 \cdot 10^3}} - 1 \right) = 8,5 \text{ кОм}$$

Принимаем $R = 8,2 \text{ Ом}$.

Контрольные вопросы.

1. Дать определение триггера и описать структуру и принцип работы симметричного триггера.
2. Дать характеристику RS-триггера на транзисторах.
3. Назначение цепи смещения в базовых цепях транзисторов и ускоряющих емкостей С в цепи коллекторно-базовых связей.

Практическое занятие № 3

Тема: Симметричный мультивибратор с общим эмиттером

Задание.

1. Изобразить схему мультивибратора
2. Описание работы схемы
3. Рассчитать мультивибратор с коллекторно-базовыми связями

Общие сведения.

Мультивибратор – электронный генератор периодических сигналов: импульсов прямоугольной, треугольной и синусоидальной формы с задающей частотой.

Импульсы различной формы используются в качестве управляющих сигналов устройств силовой электроники и преобразовательной техники.

Мультивибраторы отличаются от триггеров наличием время-задающих элементов, состоящих из конденсаторов и резисторов, и формировании импульсов путем сменяющихся состояний ключей.

Простейшим генератором колебаний прямоугольной формы служит симметричный мультивибратор (рис. 3.1).

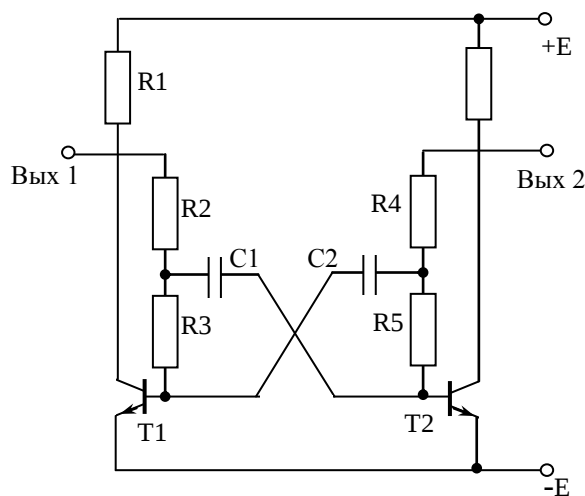


Рис. 3.1. Симметричный мультивибратор с общим эмиттером

Для симметричного мультивибратора длительность импульса равна длительности паузы.

Каждый транзистор охвачен отрицательной обратной связью через R2, R3 и R4, R5 и положительной связью через C1, C2. Если напряжение на коллекторе T2 возрастает, то через цепь R4—C2 в базу T1 потечет положительный ток, отпирающий T1. Его коллекторное напряжение начинает уменьшаться и через цепь R4—C2 вызовет дальнейшее запираение T2, то есть еще более быстрое возрастание его коллекторного напряжения. В результате происходит скачкообразное запираение T2 и отпираение T1. Это состояние будет сохраняться до тех пор, пока не произойдет полный заряд C2, после чего

ток в цепи базы Т1 уменьшится до нуля и начнется отпирание Т2 за счет тока на его базу через R5 по цепи R4—R5 и разряда C2 через Т2 и источник Е. Положительная обратная связь вызовет снова скачкообразное изменение напряжения, но Т2 откроется, а Т1 закроется и т. д. При симметрии параметров обеих половин схемы длительности импульсов положительной и отрицательной полярности оказываются примерно равными, частота следования импульсов:

$$f_z = \frac{1}{2} R_2 C_1 = \frac{1}{2} R_4 C_2$$

Такой мультивибратор называют симметричным. В схемах несимметричных мультивибраторов ($R_2 C_1 \neq R_4 C_2$) длительности положительных и отрицательных импульсов различны.

Исходные данные.

- амплитуда выходного импульса U_m (5 – 10) В;
- частота выходных импульсов $F = 1 \text{ кГц}$;
- длительность фронта импульса $t_{\phi} = 1,5 \text{ мкс}$.

Таблица вариантов.

№ варианта	U_m (В)	F (кГц)	t_{ϕ} (мкс)	β
1	8	300	1	20
2	9	250	1,1	30
3	10	400	1,2	45
4	12	450	1,3	50
5	15	500	1,4	60
6	17	600	1,5	70
7	20	500	1,6	65
8	17,5	400	1,7	80
9	15	350	1,6	40
10	12	300	1,7	75
11	10	200	1,6	20
12	9	350	1,5	25
13	8	300	1,4	35
14	7	320	1,3	45
15	11	355	1,3	85
16	6	400	1,2	75
17	8	500	1,1	75
18	6,5	650	1	70
19	7,3	700	1,1	50
20	13,2	400	1,4	80
21	14	450	1,2	65

Пример расчета.

Рассчитать симметричный мультивибратор с коллекторно-базовыми связями при следующих исходных данных: амплитуда выходного импульса

$U_m = 10В$, частота выходных импульсов $F = 1кГц$, длительность фронта импульса $t_{\phi} = 1,5 мкс$.

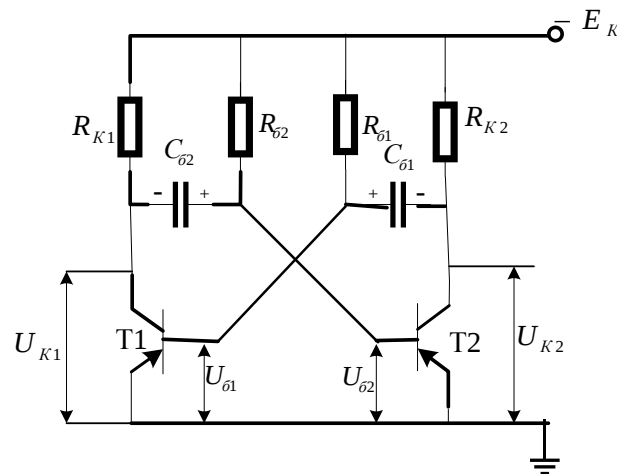


Рис. 3.2. Мультивибратор с коллекторно-базовыми связями

Напряжение источника питания

$$E_K = (1,1 \dots 1,2)U_m = 1,2 \cdot 10 = 12В$$

Выбираем транзистор из условий

$$f_a \geq \frac{1}{2\pi t_{\phi}} = \frac{1}{6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 105 кГц;$$

$$U_{к.дон} \geq 2E_K = 2 \cdot 12 = 24В.$$

Этим условиям удовлетворяет транзистор МП21Г с параметрами:

$$\beta = 20 \dots 80, U_{к.дон} = 30В, f_a = 1МГц, I_{к.дон} = 300мА.$$

Определяем сопротивление резистора в коллекторной цепи

$$R_K = \frac{E_K}{I_{кн}} = \frac{12}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,2 кОм$$

Принимаем $R_K = 1кОм$.

Находим сопротивления базовых времязадающих резисторов:

$$R_6 \leq \beta R_K = 20 \cdot 1 \cdot 10^3 = 20кОм$$

Выбираем $R_6 = 18 кОм$

Емкость времязадающих конденсаторов:

$$C_6 = \frac{1}{1,4FR_6} = \frac{1}{1,4 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 18 \cdot 10^3} = 0,04 мкФ$$

Принимаем $C_6 = 0,04 мкФ$

Контрольные вопросы.

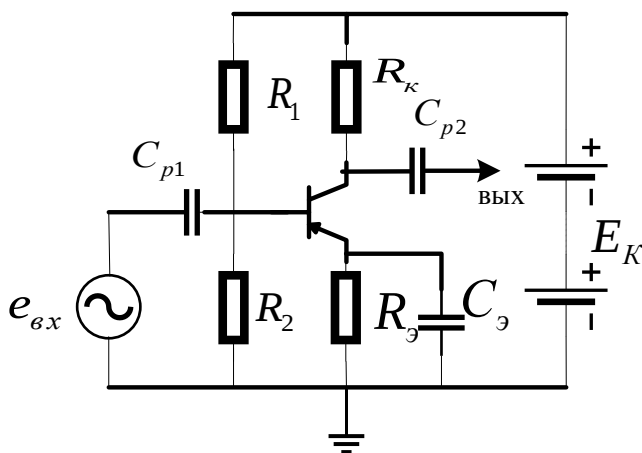
1. Назначение мультивибратора. Схема симметричного мультивибратора. Схема и принцип работы.
2. Работа схемы мультивибратора с коллекторно-базовыми связями
3. Как устанавливается частота генерируемых импульсов, используя формулу с параметрами.

Практическое занятие № 4

Тема: Однокаскадный усилитель на транзисторе с общим эмиттером

Задание.

1. Изобразить схему однокаскадного усилителя переменных сигналов с общим эмиттером
2. Знать состав и назначение схемы транзисторного усилителя переменного тока с емкостной связью с общим эмиттером
3. По исходным данным варианта задания рассчитать параметры эмиттерной стабилизации рабочей точки
4. В виде реферата ответить на контрольные вопросы



Задача расчета.

Расчет каскада предварительного усиления заключается в выборе элементов схемы при заданном коэффициенте усиления и мощности. При этом должна быть удовлетворительная частотная характеристика, чтобы при заданном диапазоне частот входного сигнала сохранялся постоянным коэффициент усиления $\beta = 20 \dots 80$.

Чем больше коэффициент усиления, тем больше влияния помех и температурной нестабильности параметров транзистора.

Для уменьшения этого влияния применяют схемы стабилизации.

Схемы стабилизации важны для случаев замены транзисторов при выходе из строя, но новый транзистор может не иметь подобных параметров.

Особенности схемы усилителя с ОЭ:

- входной переменный сигнал подается на переход транзистора «база-эмиттер» (Э-Б) через разделительный конденсатор C_{p1} ;
- выходной усиленный сигнал снимается с коллектора транзистора и подается на вход последующего каскада усилителя через разделительный конденсатор C_{p2} ;
- при отсутствии входного сигнала $e_{вх} = 0$ к переходу «эмиттер-база» (Э-К) подается напряжение смещения, обеспечивающие протекание

установочного постоянного тока Э-К от источника питания по цепи $(+E_k) \rightarrow R_3 \rightarrow VT \rightarrow R_k \rightarrow (-E_k)$

- при появлении входного сигнала $e_{ex} \neq 0$ к переходу Э-Б подводится переменное напряжение, вызывающее ток $i_{\approx}$, которое накладывается на постоянный ток i_0 смещения

$$i_{эб} = i_0 + i_{\approx}$$

Смещение должно быть на 20...30 % больше амплитуды входного сигнала для того, чтобы переход Э-Б всегда был открыт: в противном случае возникают так называемые линейные искажения. Такой режим называется режимом А.

- начальный режим смещения (установление нулевого режима без входного сигнала) выставляется за счет потенциометрического делителя R1-R2; Эта цепь резисторов играет роль температурной стабилизации нулевой точки
- для уменьшения влияния на положение рабочей точки разброса параметров транзистора и величины тока нагрузки в цепи «эмиттер-коллектор» (Э-К) используется эмиттерная стабилизация посредством включения сопротивления $R_э$ (величина $R_э$ влияет на коэффициент усиления); чтобы исключить влияние $R_э$ на усиление переменного сигнала, резистор $R_э$ шунтируется достаточно большой емкостью $C_э$.
- сопротивление R_k выбирается из условия максимальной мощности цепи нагрузки транзистора по постоянному току

$$I_{эк} \approx I_k \approx \frac{E_k}{R_k} < I_{дон},$$

тогда

$$P_k = \frac{E_k^2}{R_k} < P_{дон}.$$

Для случая полного открытия транзистора в режиме насыщения.

Исходные данные для расчета.

Расчет ведем для условного транзистора, для которого заданы диапазоны изменения параметров (для схемы с общим эмиттером):

$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э} \approx 0,93 \dots 0,98$ – коэффициент усиления по току в схеме с общей базой;

$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_б} \approx 20 \dots 80$ – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером.

$R_{ex} = \frac{\Delta U_{эб}}{\Delta I_э} = 400 \dots 600 \text{ Ом}$ – входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ;

$R_{вых} = \frac{\Delta U_{кз}}{\Delta I_k} = 4000 \dots 8000 \text{ Ом}$ – выходное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ;

$E_k = 5 \dots 20 \text{ В}$ ЭДС источника в цепи коллектора.

Принимаем во внимание, что для схемы с ОЭ

$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ что среднее значение выходного тока не изменяется с изменением амплитуды сигнала (режим А).

Расчет схем стабилизации рабочей точки.

Стабилизация рабочей точки осуществляет при помощи обратной связи по постоянному току

1) установление рабочей точки, за счет смещения, подаваемого на базу от делителя напряжения R1, R2

2) мощность по постоянному току на выход

$$P_{\kappa} = \frac{E_{\kappa}^2}{R_{\text{вых}}} = \frac{10^2}{4000} = 0,025 \text{ Вт}$$

3) по формуле

$$P = I_{\kappa}^2 \cdot R_{\text{вых}}$$

Откуда

$$I_{\kappa 0} = \sqrt{\frac{P_{\kappa}}{R_{\text{вых}}}} = \sqrt{\frac{0,025}{4000}} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ А} = 2,5 \text{ мА}$$

4) входной ток по формуле

$$\Delta I_{\text{б0}} = \frac{\Delta I_{\kappa 0}}{\beta} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 0,05 \text{ мА.}$$

5) напряжение смещения на входе

$$U_{\text{бз0}} = \Delta I_{\text{б0}} \cdot R_{\text{вх}} = 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 20 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ мВ}$$

6) ток делителя через сопротивление

$$I_{\text{д}} = (1 \dots 5) I_{\text{б ср}} = 2,5 \cdot I_{\text{б ср}} = 0,125 \cdot 10^{-3} = 0,125 \text{ мА}$$

7) расчет R1 и R2 по формуле

$$R_1 = \frac{E_{\kappa} - U_{\text{бз0}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{б ср}}} = \frac{10 - 20 \cdot 10^{-3}}{(0,125 + 0,05) \cdot 10^{-3}} = 57,03 \cdot 10^{-3} \text{ кОм}$$

$$R_2 = \frac{U_{\text{бз0}}}{I_{\text{д}}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{0,125 \cdot 10^{-3}} = 160 \text{ Ом}$$

8) расчет величины R_3 находим по допустимому на этом сопротивлении падению напряжению

$$R_3 \approx \frac{(0,05 - 0,3) E_{\kappa}}{I_{\kappa 0}} = \frac{0,1 \cdot 10}{0,25 \cdot 10^{-2}} = 0,4 \cdot 10^{-3} = 400 \text{ Ом}$$

Варианты задания.

вариант	ЭДС $E_k(B)$	α	β	$R_{ex}(OM)$	$R_{свex}(OM)$
1.	5	0,96	24	400	4000
2.	7	0,965	30	420	4500
3.	7	0,97	35	500	5000
4.	9	0,975	40	450	5500
5.	10	0,98	40	550	6000
6.	12	0,985	45	600	6500
7.	13	0,99	50	650	7000
8.	15	0,95	55	550	7500
9.	15	0,96	60	700	8000
10.	18	0,97	65	600	8500
11.	20	0,975	70	750	6000
12.	22	0,98	75	650	6500
13.	25	0,985	80	600	4500
14.	30	0,99	90	470	4000
15.	14	0,95	55	600	7000
16.	9	0,97	35	450	5000
17.	10	0,98	40	500	7000
18.	14	0,96	45	600	5000

Контрольные вопросы.

1. Объяснить работу усилителя переменных сигналов в схеме с общим эмиттером (расчетная схема).
2. Что такое рабочая точка и в чем заключается ее стабилизация.
3. Принципиальная схема для снятия входных характеристик $I_b = f(U_{зб})$ при $U_{кз} = const$ для транзистора, включенного с общим эмиттером.
4. Принципиальная схема для снятия выходных характеристик $I_k = f(U_{кз})$ при $I_b = const$ для транзистора, включенного с общим эмиттером.
5. Дать определение (записать формулу) коэффициента усиления по току β для выбранной рабочей точки.

Практическое задание № 5

Тема: Операционные усилители

Задание.

1. Дать определение основных характеристик усилителя:
 - Коэффициент усиления;
 - Частотные и фазовые характеристики;
 - Амплитудная характеристика.
2. Действие обратной связи в усилителях
3. Определение операционного усилителя
4. Структурные схемы дифференцирования и интегрирования входного сигналов.

Основные определения и характеристики усилителей.

Коэффициент усиления определяет отношение напряжения или тока на выходе усилителя к напряжению или току на входе усилителя.

Комплексной форме входной сигнал имеет вид:

$$u_{ex} = U_{ex} \cdot e^{j\varphi_{ex}} = \underline{U}_{ex}$$

Сигнал напряжения на выходе:

$$u_{ex} = U_{ex} \cdot e^{j\varphi_{ex}} = \underline{U}_{ex}$$

Коэффициент усиления

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}_{ex}}{\underline{U}_{ex}} \cdot e^{j(\varphi_{ex} - \varphi_{ex})} = K \cdot e^{j\varphi},$$

где K – модуль коэффициента усиления; φ – фазовый сдвиг между входным и выходными сигналами (напряжением или токами).

Частотные и фазовые характеристики.

Малые входные сигналы могут иметь различную частоту. В определенном диапазоне частот входного сигнала коэффициент усиления $K = \text{const}$. За пределами этого диапазона коэффициент K может резко падать.

Если входные сигналы - несинусоидальные или представляют некоторую сумму гармонических колебаний с различными частотами, то для этих составляющих коэффициент усиления может быть различным, тогда амплитудный спектр входного сигнала отличается от спектра входного сигнала. Такие искажения усиленного сигнала называются *частотными искажениями*.

Пусть входной сигнал синусоидальный (гармонический), тогда при изменении частоты входного сигнала, будем иметь различные фазовые

соотношения $\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = \varphi(\omega)$. Такие изменения называются *фазовыми искажениями*.

При входном сигнале с частотой $f_{\text{вх}} = 0$ имеем усилитель постоянного напряжения или тока.

Для усиления слабых сигналов постоянного напряжения и тока применяют последовательно несколько каскадов усиления. Такие многокаскадные усилители с коэффициентом усиления $K > 10000$, называют *операционными усилителями ОУ*.

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления ($K_v \geq 10000$), охваченный сильной отрицательной обратной связью.

С помощью ОУ выполняются такие математические операции над входными сигналами, как умножение на постоянный коэффициент, суммирование нескольких сигналов, интегрирование и дифференцирование, фильтрация, нелинейные преобразования и другие

Схемы включения операционных усилителей.

Непосредственное использование ОУ оказывается невозможным по причине слишком большого коэффициента усиления, так как малейший сигнал на входе приводит к работе в режиме насыщения, при котором входной сигнал равен напряжению источника питания. Поэтому трудно оценить величину K , а опыт показывает, что K является неустойчивой величиной.

Обратные связи в усилителе.

Обратная связь – это передача части энергии с выхода усилителя на его вход. Схема усилителя с обратной связью показана на рис. 5.1.

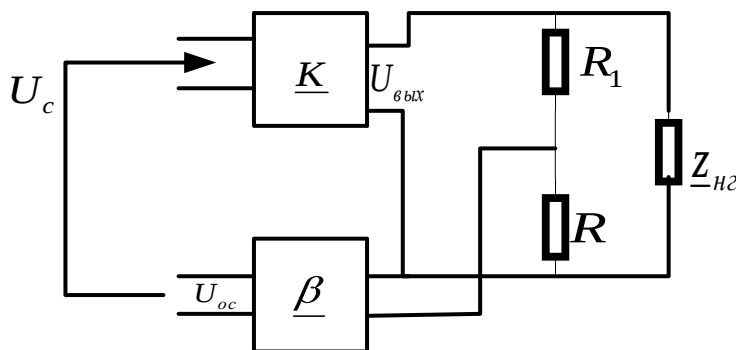


Рис. 5.1. Структурная схема усилителя с обратной связью

Напряжение обратной связи $U_{oc} = \beta \cdot U_{\text{вых}}$ обычно малую часть выходного напряжения, которая подается на вход. Поскольку это напряжение

снимается с делителя из активных сопротивлений $R_1 - R$, то напряжение обратной связи U_{oc} находится в фазе с выходным напряжением. Для усилителя постоянного напряжения или тока, типа ОУ, $U_{oc} = \beta \cdot U_{\text{вых}}$. Это напряжение по отношению к входному постоянному сигналу направляется встречно, что приводит к ослаблению входного сигнала. Вследствие этого на вход подается уменьшенный сигнал U_c :

$$U_c = U_{\text{вх}} - U_{oc} \quad (1)$$

В результате коэффициент усиления с учетом отрицательной обратной связи будет определяться по формуле

$$K_{oc} = \frac{K}{(1 + \beta K)} \quad (2)$$

где K – коэффициент усиления ОС;

$$\beta = \frac{U_{oc}}{U_{\text{вых}}} \quad (3)$$

Показывает долю напряжения, снимаемого с выхода усилителя и подаваемого на его вход.

При подключении напряжения обратной связи последовательно с входным напряжением, схема усилителя приобретает вид рис. 5.2.

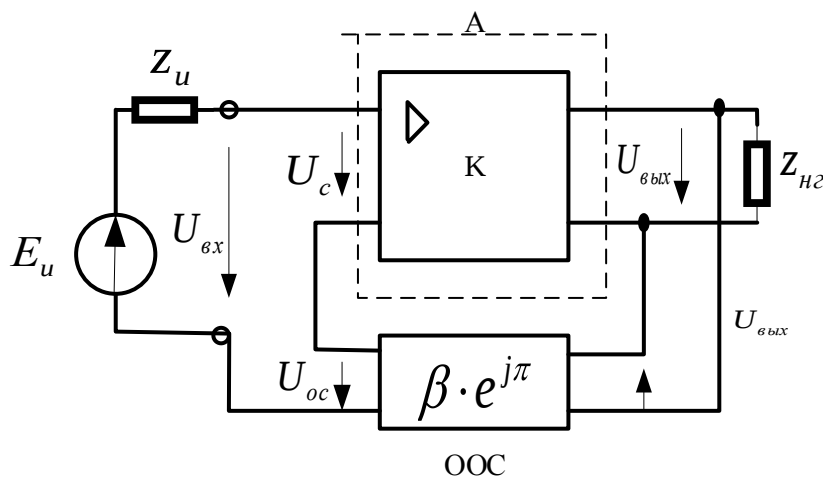


Рис. 5.2. Схема усилителя с подключением обратной связи последовательно с входным напряжением

Если U_u и U_{oc} находятся в противофазе, в случае переменного усиливаемого сигнала источника E_u , то имеем отрицательную обратную связь (ООС).

Обычно β оценивается по модулю. Для усиления постоянного сигнала и ООС получим формулу (1). Блок ООС β уменьшает выходной сигнал по модулю в β раз, изменяет его полярность на противоположную и тем самым вычисляется из входного сигнала.

Пример расчета.

Коэффициент усиления $K_U = 1000$ По внешним причинам уменьшился до 900. Относительное изменение составляет

$$\frac{\Delta K_U}{K_U} = \frac{1000 - 900}{1000} = 0,1 \text{ (10\%)}$$

В усилитель вводится ООС $\beta = 0,03$.

Относительное изменение коэффициента усиления определяется по формуле

$$\frac{\Delta K_U / K_U}{1 + \beta \cdot K_U} = \frac{10}{1 + 0,03 \cdot 1000} = 0,032 \text{ (0,32\%)}$$

Операционный усилитель ОУ усилитель постоянного тока охваченный сильной ООС, используется для работы в обычном режиме усиления.

При включении во входную цепь конденсатора C , а в цепь ОС резистора R_{oc} на выходе получаем сигнал:

$$U_{\text{вых}} = -R_{oc} \cdot C \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}. \quad (4)$$

При этом выполняется дифференцирование сигнала на входе с пропорциональным изменением его в $\alpha = R_{oc} \cdot C$ раз (рис. 5.3).

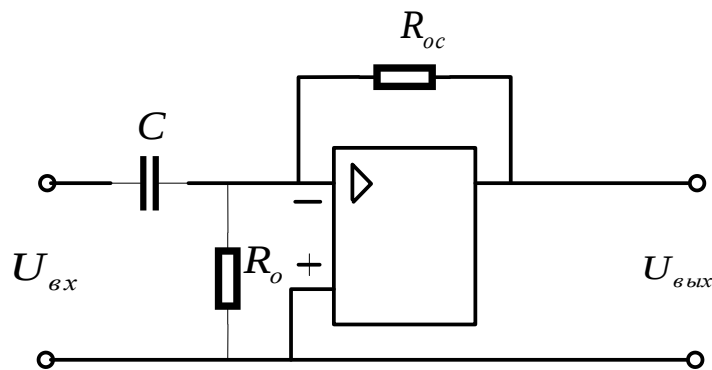


Рис. 5.3. Схема усилителя, выполняющего дифференцирование сигнала

При включении в цепь ОС конденсатора C , а во входную цепь – резистора R_1 (рис. 5.4) напряжение на выходе равно:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{R_1 \cdot C_{oc}} \int_0^t U_{\text{вх}} \cdot dt, \quad (5)$$

То есть получаем интегрирование входного сигнала.

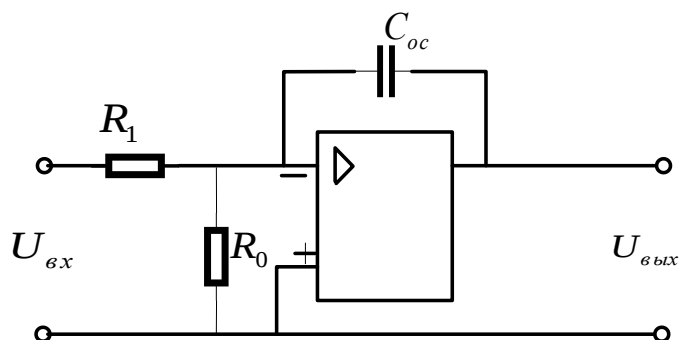


Рис. 5.4. Схема усилителя, выполняющего интегрирование входного сигнала

Варианты задания.

параметр № вариант	K заданный коэффициент усиления до введения ОС	β коэффициент ОС	K^1 сползание коэффициента усиления в абсолютных величинах
1	1000	0,98	900
2	1500	0,97	1440
3	1600	0,975	1500
4	2000	0,96	2950
5	2200	0,965	2100
6	2500	0,99	2400
7	2600	0,985	2500
8	1900	0,98	1800
9	1800	0,95	1700
10	1650	0,98	1500
11	4000	0,97	3800
12	4500	0,98	4300
13	5000	0,99	4900
14	6000	0,975	5550
15	5500	0,95	5000
16	6500	0,98	6000
17	6200	0,97	9000
18	10000	0,95	9000

Требуется:

- Определить $K_{ос}$ коэффициент усиления с учетом введения ООС с заданным β ;
- Определить отклонения коэффициента усиления от заданного без ОС в процентном отношении;
- Определить отклонения коэффициента усиления с введенной ОС.

Контрольные вопросы.

1. Дать определение усилителя. Коэффициенты усиления: K_I, K_U, K_P
2. Назначение отрицательной обратной связи (ООС) в усилителях.
3. Что такое операционный усилитель ОУ
4. Какие виды ООС в ОУ применяют для дифференцирования и интегрирования сигналов, поступающих на вход. Объяснить работу схем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника / С.А. Ефименко А.С. Турцевич. Москва: Техносфера, 2013. – 216 с. + 12 с. цв. Вкл
2. Бочаров Л.Н. Расчет Электронных устройств на транзисторах/ Л.Н. Бочаров, С.К. Жердяков, И.Ф. Колесников – М.: Энергия, 1978. – 257 с.
3. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники. М.: “Высшая школа” 2004.
4. Горбачёв Г.Н. Промышленная электроника/ Г.Н. Горбачёв, Е.Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.- 320 с.
5. Гусев В.Г. Электроника/ В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. - М.: Высшая школа, 1991.-622 с.
6. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М – М.: Высшая школа, 1982, 224 с.
7. Мелешкин Л.П. Руководство к практическим работам по основам промышленной электроники. - М.: “Высшая школа”, 1978.

Пронина Анна Константиновна

Силовая электроника и преобразовательная техника

*Методические указания
к выполнению практических работ по дисциплине*

Часть 1

В авторской редакции

Изд. № 172/2020. Объем 1,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»