

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:27:25

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

1. Полупроводниковые приборы и выпрямители	4
2. Расчет h -параметров биполярных транзисторов	4
3. Усилители постоянного и переменного тока	4
4. Расчет однотактного безтрансформаторного каскада усилителя переменного тока по схеме с общим эмиттером	5
5. Расчет однотактного трансформаторного каскада усилителя мощности.	8
4. Расчет двухтактного трансформаторного каскада усилителя мощности.	12
5. Расчет двухтактного безтрансформаторного каскада усилителя мощности.	16
6. Расчет усилителя прямоугольных импульсов	18
7. Генераторы прямоугольных импульсов на операционных усилителях	23
8. Расчёт автогенератора прямоугольных импульсов	23
9. Рекомендуемая литература	25

Полупроводниковые приборы и выпрямители

1. Расчет h -параметров биполярных транзисторов

Под динамическими параметрами транзистора понимают отношение приращений токов и напряжений вблизи той или иной рабочей точки на характеристиках транзистора. Поскольку характеристики транзисторов нелинейны, значения динамических параметров одного и того же транзистора будут различными для разных рабочих точек. Для определения динамических параметров пользуются входными и выходными характеристиками, полученными экспериментально. В данной задаче требуется найти динамические параметры транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером. По входным характеристикам определяют следующие параметры:

$h_{11} = \Delta U_{ЭБ} / \Delta i_B$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ – входное динамическое сопротивление,

$h_{12} = \Delta U_{ЭБ} / \Delta U_{КЭ}$ при $i_B = \text{const}$ – коэффициент обратной связи по напряжению.

По выходным характеристикам определяют параметры:

$h_{21} = \Delta i_K / \Delta i_B$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ – коэффициент передачи тока (коэффициент усиления базового тока),

$h_{22} = \Delta i_K / \Delta U_{КЭ}$ при $i_B = \text{const}$ – выходную проводимость.

Здесь: i_K – ток коллектора,

i_B – ток базы,

$U_{ЭБ}$ – напряжение между эмиттером и базой,

$U_{КЭ}$ – напряжение между коллектором и эмиттером.

Приращения перечисленных величин берут вблизи заданной рабочей точки. Характеристики транзисторов имеются в приложениях к настоящим методическим указаниям, их можно взять также из справочников по полупроводниковым приборам. Решая задачу, характеристики следует перерисовать в масштабе, на чертеже отметить взятые для вычислений приращения. Параметр h_{11} следует определять по входной характеристике, снятой при $U_{КЭ} > 0$.

2. Усилители постоянного и переменного тока

Выбор схемы усилителя определяется рядом факторов, основными из которых являются: мощность нагрузки, сопротивление нагрузки, диапазон усиливаемых частот, требования к уровню нелинейных искажений. В каскадах предварительного усиления, где расходуется незначительная

мощность, используются однотактные схемы, в которых транзисторы работают в режиме А. В выходных каскадах при мощности нагрузки более 1 – 2 Вт используют, как правило, двухтактные схемы усиления, имеющие более высокий к.п.д.. В двухтактных схемах транзисторы работают в режиме В, либо в режиме АВ, обеспечивающем меньший уровень нелинейных искажений за счёт исключения работы на существенно нелинейном начальном участке входной характеристики. Наиболее распространёнными являются схемы усилителей с общим эмиттером, т.к. позволяют усиливать и ток, и напряжение. В выходных каскадах при малых сопротивлениях нагрузки, когда не требуется усиления напряжения, применяют двухтактные бестрансформаторные схемы с общим коллектором. Схемы с общей базой используют при повышенных требованиях к уровню нелинейных искажений. Во всех случаях более предпочтительными являются бестрансформаторные схемы, как более дешёвые, имеющие больший к.п.д. и меньшие габариты и массу. Трансформаторы в схемах используют при необходимости согласования выходного сопротивления каскада с сопротивлением нагрузки.

Ниже приводится несколько вариантов схем каскадов усилителей с описанием их применения и методикой их расчёта. Студент должен самостоятельно в соответствии с вариантом задания выбрать ту или иную схему.

2.1. Расчет однотактного бестрансформаторного каскада усилителя переменного тока по схеме с общим эмиттером.

Схема электрическая принципиальная однотактного бестрансформаторного усилителя переменного тока с общим эмиттером представлена на рис. 2.1.

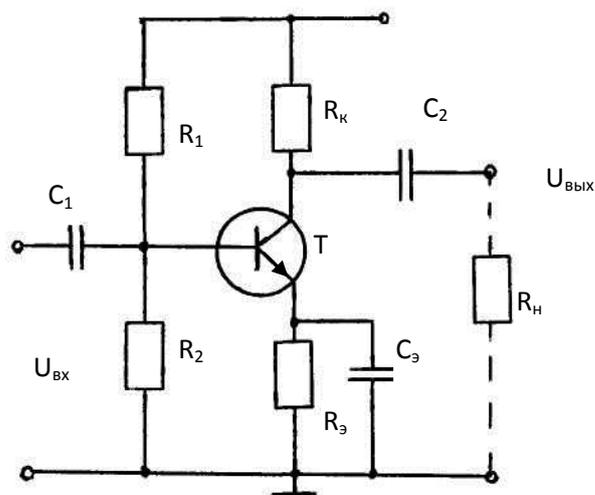


Рис. 2.1. Схема электрическая принципиальная однотактного бестрансформаторного усилителя переменного тока с общим эмиттером.

Режим транзистора по постоянному току обеспечивается делителем напряжения R_1R_2 и сопротивлением R_3 , обеспечивающим стабилизацию положения начальной рабочей точки (НРТ). Конденсаторы C_1 и C_2 являются разделительными, то есть служат для предотвращения прохождения постоянного тока во входной и выходной цепях каскада. Конденсатор C_3 , имеющий для переменной составляющей тока сопротивление, во много раз меньшее сопротивления резистора R_3 , устраняет отрицательную обратную связь по переменной составляющей, которая существенно снижала бы коэффициент усиления каскада.

Для выполнения расчета необходимо иметь следующие данные:

- мощность и сопротивление нагрузки;
- диапазон частот усиливаемого сигнала.

Порядок расчета каскада следующий:

1) Выбрать транзистор со следующими предельными параметрами:

- предельная мощность, рассеиваемая коллектором:

$$P_{\text{доп}} > (1 - \eta_k) P_n,$$

где η_k – к.п.д. рассчитываемого каскада (для каскадов с транзисторами, работающими в режиме А – 0,3...0,35);

P_n – мощность нагрузки

- допустимые напряжение коллектор – эмиттер и ток коллектора

$$U_{\text{кдоп}} > 2,2 U_{\text{кmax}} = 2,2 \sqrt{(2P_n R_n)},$$

где $U_{\text{кmax}}$ – амплитуда напряжения на коллекторе,

R_n – сопротивление нагрузки,

$$I_{\text{кдоп}} = 2,2 I_{\text{кmax}} = 2,2 \sqrt{(2P_n / R_n)},$$

где $I_{\text{кmax}}$, $I_{\text{кдоп}}$ – амплитуда тока и допустимый ток коллектора

2) Выбрать напряжение источника питания:

$$E_k > 2,2 U_{\text{кmax}}$$

3) Построить выходные характеристики выбранного транзистора (рис. 2.2). На семействе характеристик в середине активной зоны выбрать начальную рабочую точку (НРТ) с координатами $U_{\text{кн}}$, $I_{\text{кн}}$. $I_{\text{кн}}$ не должен превышать половины наибольшего тока коллектора в активной зоне. Через точку с координатами $U_k = E_k$, $I_k = 0$ и НРТ провести линию нагрузки по постоянному току (ЛН₋).

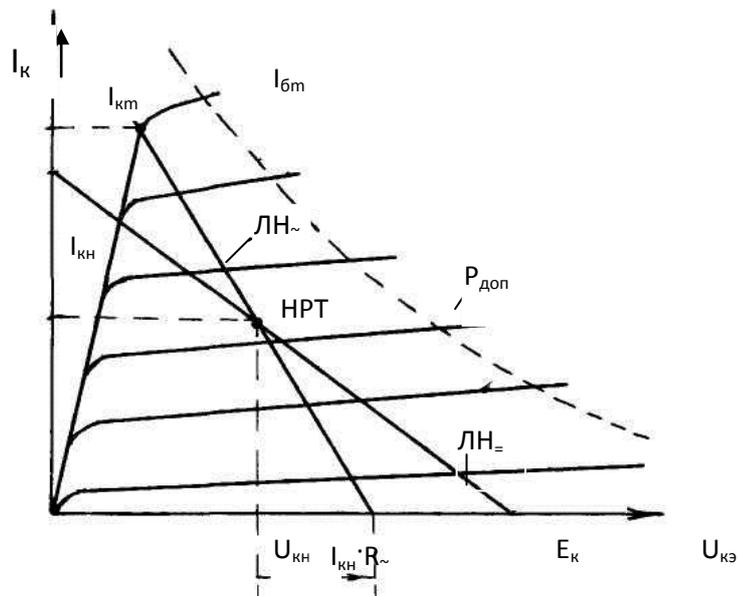


Рис. 2.2. Выходные характеристики выбранного транзистора

4) Вычислить сумму сопротивлений в цепи коллектор-эмиттер.

$$R_k + R_э = \frac{E_k}{I_m}$$

5) Принять напряжение на сопротивлении эмиттера $U_{Rэ} = (0,1 \dots 0,3)E_k$ и, учитывая, что $I_э \approx I_к$, вычислить

$$R_э = \frac{U_{Rэ}}{I_{кн}}, \text{ тогда } R_k = \frac{E_k}{I_m} - R_э.$$

6) Определить максимально возможный ток базы, соответствующий минимальному коэффициенту передачи базового тока в схеме с общим эмиттером для выбранного транзистора:

$$i_{б\max} = \frac{I_{кн}}{\beta_{\min}}$$

7) Принять ток делителя

$$i_d = (8 \dots 10) i_{б\max}.$$

Затем найти сумму сопротивлений делителя

$$R_1 + R_2 = \frac{E_k}{i_d}.$$

8) Пользуясь входной характеристикой, найти напряжение $U_{эб}$, обеспечивающее ток базы, соответствующий выходной характеристике, на которой расположена НРТ. Найти необходимое напряжение, снимаемое с делителя R1R2.

$$U_{R2} = U_{эб} + U_{Rэ}.$$

9) Найти значения сопротивлений R_1 и R_2 .

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{i_d}, \quad R_1 = (R_1 + R_2) - R_2.$$

На этом расчет каскада по постоянному току заканчивается.

10) Построить линию нагрузки по переменному току ЛН_л в соответствии с сопротивлением

$$R_{л} = R_{к} R_{н} / (R_{к} + R_{н}),$$

где $R_{н}$ – сопротивление нагрузки.

Линия ЛН_л должна располагаться в пределах активной зоны выходных характеристик.

Для того, чтобы выходной сигнал каскада был достаточным для работы нагрузки, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$I_{к\max} R_{л} / R_{н} = I_{к\max} R_{к} / (R_{н} + R_{к}) \geq \sqrt{2 P_{н} / R_{н}}.$$

11) Емкости конденсаторов найти, исходя из соотношений:

$$X_{с1} = (0.01 \dots 0.05) R_{вх} = 1 / (\omega C_1),$$

$$X_{с2} = (0.01 \dots 0.05) R_{н} = 1 / (\omega C_2),$$

$$X_{с3} = (0.01 \dots 0.05) R_{э} = \frac{1}{\omega C_3},$$

где ω – минимальная частота усиливаемого сигнала;

$R_{вх}$ – входное сопротивление транзистора рассчитываемого каскада, которое следует определить по входным характеристикам.

Следует заметить, что ввиду значительного разброса параметров и характеристик транзисторов найденные параметры элементов схемы каскада необходимо уточнять при его наладке.

2.2. Расчет однотактного трансформаторного каскада усилителя мощности.

Схема усилителя представлена на рис. 2.3. Порядок расчета следующий:

1) определяют мощность, рассеивающуюся на коллекторе:

$$P_{к} = \frac{P_{н}}{\eta_{тр} \eta_{т}},$$

где $P_{н}$ – заданная мощность нагрузки;

$\eta_{тр}$ – к.п.д. трансформатора;

$\eta_{т}$ – к.п.д. транзистора, который в данной схеме имеет величину 0,3...0,4.

К.п.д. трансформатора в зависимости от мощности принять в соответствии с данными таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Мощность выходного трансформатора, ВА	< 0,02	0,02- 0,1	0,1- 0,5	0,5-1	1-10	10-50	50- 100	> 100
$\eta_{тр}$	0,75	0,78	0,82	0,85	0,88	0,9	0,92	0,95

+E_к

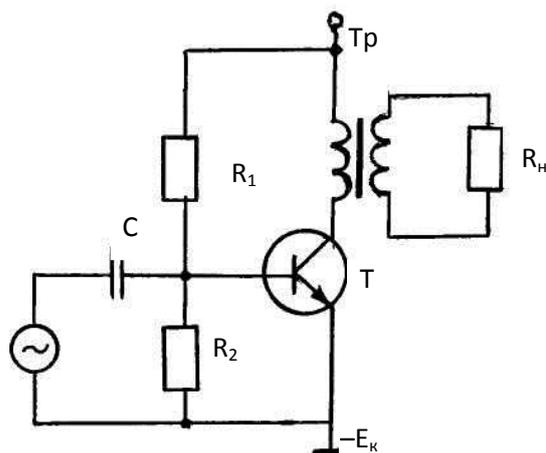


Рис. 2.3. Схема электрическая принципиальная одноконтурного трансформаторного каскада усилителя мощности.

2) выбирают транзистор, исходя из условия:

$$P_{\text{доп}} > P_{\text{к}},$$

где $P_{\text{доп}}$ – допустимая мощность, рассеиваемая на коллекторе;

Если напряжение источника питания $E_{\text{к}}$ задано, то по допустимому напряжению между коллектором и эмиттером транзистор должен удовлетворять условию:

$$U_{\text{к,доп}} > 2,2E_{\text{к}}.$$

Если напряжение $E_{\text{к}}$ не задано, то его рассчитывают, используя записанное неравенство. Если величина $E_{\text{к}}$ превышает допустимое значение, то питание каскада необходимо осуществить через цепочку $R_{\text{ф}}C_{\text{ф}}$ из гасящего сопротивления и сглаживающего конденсатора.

3) строят семейство выходных характеристик выбранного транзистора (рис. 2.4). Принимают минимальное напряжение U_{min} на коллекторе так, чтобы левая часть линии нагрузки по переменному току ЛН_л находилась правее излома верхней выходной характеристики. Это существенно уменьшит нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

4) определяют падение напряжения на первичной обмотке трансформатора:

$$\Delta E = \frac{(E_{\text{к}} - U_{\text{min}})(1 - \eta_{\text{тр}})}{2}.$$

5) определяют максимально возможную амплитуду напряжения выходного сигнала:

$$U_{\text{кн}} = E_{\text{к}} - \Delta E - U_{\text{min}}.$$

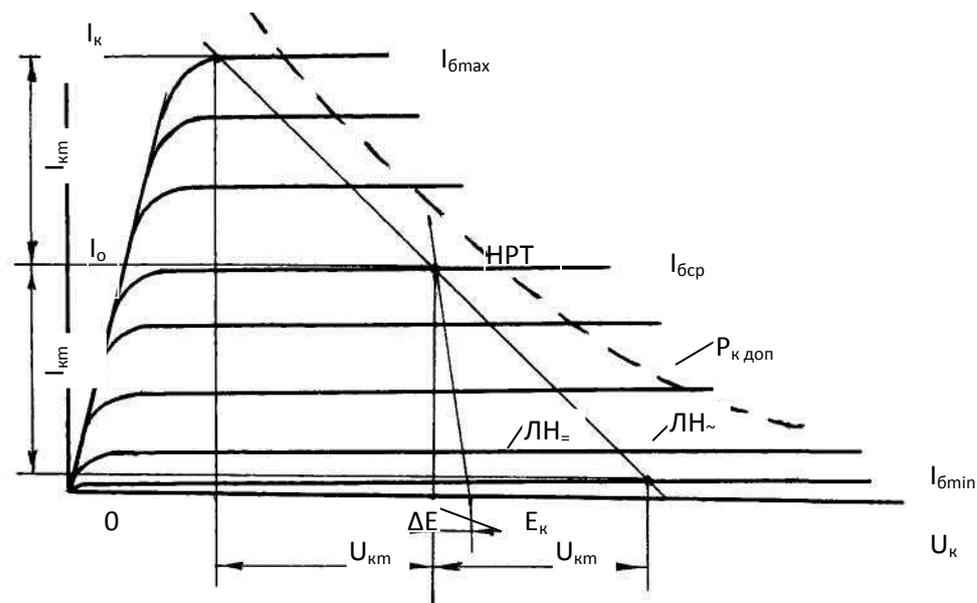


Рис. 2.4. Выходные характеристики выбранного транзистора

6) вычисляют мощность переменной составляющей в цепи коллектора

$$P'_H = \frac{P_H}{\eta_{тр}}$$

7) исходя из формулы

$$P'_H = U_K I_K = \frac{U_{км} I_{км}}{2},$$

где U_K , I_K – действующие значения напряжения и тока переменной составляющей, определяют максимальную амплитуду тока цепи коллектора.

$$I_{км} = \frac{2P'_H}{U_{км}}$$

8) учитывая разброс параметров транзистора и их температурные изменения, выбирают ток покоя I_0 , соответствующий НРТ, несколько больше $I_{км}$:

$$I_0 = (1,05 \dots 1,1) I_{км}$$

9) имея значения E_K , ΔE , $U_{км}$, I_0 и $I_{км}$, строят линию нагрузки по переменной составляющей ЛН_~ (см. рис. 2.4).

10) определяют приведенное сопротивление нагрузки

$$R'_H = \frac{U_{км}}{I_{км}}$$

11) коэффициент трансформации трансформатора (с учетом сопротивления обмоток трансформатора)

$$n = \sqrt{\frac{\eta_{тр} R'_H}{R_H}}$$

12) к.п.д. каскада

$$\eta_k = \frac{P_n}{E_k I_0}$$

13) амплитуда входного тока трансформатора

$$I_{1m} = \frac{I_{бmax} - I_{бmin}}{2}$$

Если выходные характеристики, соответствующие амплитудным значениям тока и напряжения коллектора отсутствуют, то $I_{бmax}$ и $I_{бmin}$ следует определить интерполяцией.

14) Для нахождения входного сопротивления каскада необходимо воспользоваться входными характеристиками транзистора (рис. 2.5). Ввиду того, что входные характеристики, снятые при различных отличных от нуля напряжениях между коллектором и эмиттером, практически совпадают, можно воспользоваться входной характеристикой, снятой при любом, отличном от нуля, напряжении.

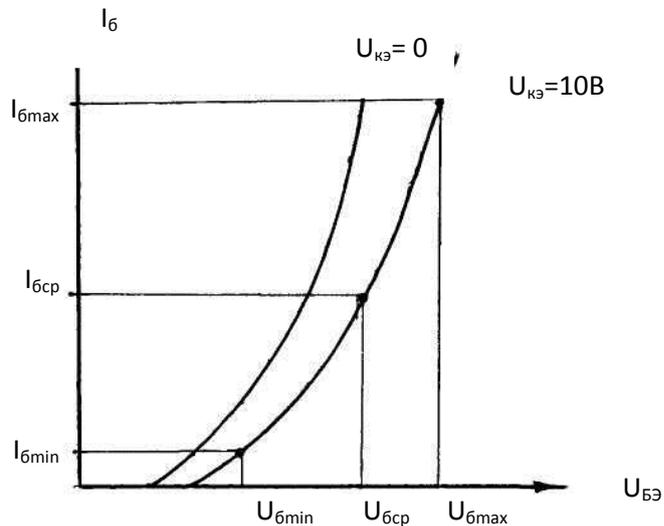


Рис. 2.5. Входные характеристики выбранного транзистора

На входной характеристике отмечают точки, соответствующие $I_{бmax}$, $I_{бmin}$ и $I_{бср}$, взятые с входных характеристик, и определяют соответствующие этим токам напряжения база-эмиттер. Среднее значение динамического сопротивления находят по формуле:

$$R_{вхср} = \frac{U_{бmax} - U_{бmin}}{I_{бmax} - I_{бmin}}$$

15) мощность входного сигнала:

$$P_1 = \frac{U_{1m} I_{1m}}{2} = \frac{(U_{бmax} - U_{бmin})(I_{бmax} - I_{бmin})}{8}$$

Значения $R_{вхср}$ и P_1 необходимы для расчета предыдущего каскада усилителя.

16) Сумму сопротивлений делителя напряжения ($R_1 + R_2$) определяют исходя из условия, чтобы в процессе работы усилителя ток базы практически

не влиял на напряжение делителя, то есть чтобы положение НРТ оставалось бы практически постоянным. Для этого ток делителя принимают на порядок больше максимального тока базы:

$$i_d = 10I_{б\max} = \frac{E}{R_1 + R_2}, \text{ откуда}$$

$$R_1 + R_2 = \frac{E}{10I_{б\max}}.$$

17) после определения значения i_d , находят R_2 и R_1 :

$$R_2 = \frac{U_{б.ср}}{i_d}, \quad R_1 = (R_1 + R_2) - R_2.$$

18) емкость разделительного конденсатора на входе принимают такой, чтобы ее сопротивление входному сигналу при наименьшей частоте было значительно ниже среднего входного сопротивления транзистора:

$$X_C < 0,1R_{вхср},$$

$$C = \frac{1}{X_C \omega_{\min}}, \quad \omega_{\min} = 2\pi f_{\min}.$$

2.3. Расчет двухтактного трансформаторного каскада усилителя мощности.

В двухтактной схеме транзисторы работают в режиме В или АВ. Благодаря незначительной величине тока покоя при работе в режиме В удается получить высокий к.п.д. каскада и снимать с каждого транзистора значительно большую мощность, чем в режиме А. Схема двухтактного каскада представлена на рис. 2.6. Требуемый режим работы (В или АВ) устанавливается с помощью делителя напряжения R_1R_2 .

Через сопротивление R_2 протекает не только постоянный ток делителя, но и та часть базового тока каждого транзистора, которая создается усиливаемым сигналом. При работе в режиме В или АВ эта часть базового тока содержит постоянную составляющую,

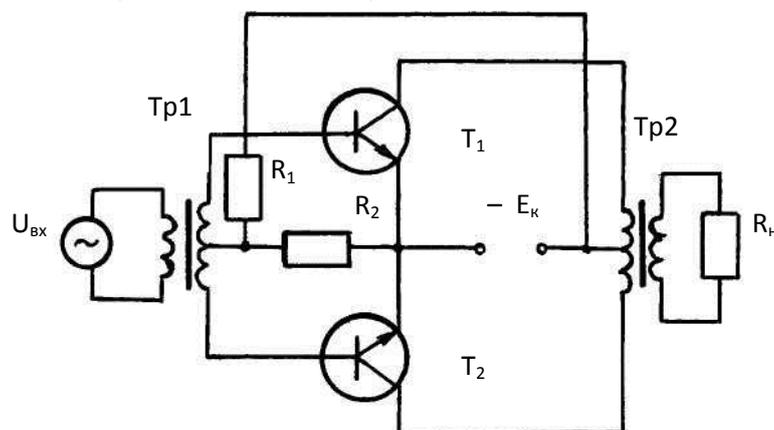


Рис. 2.6. Схема электрическая принципиальная двухтактного трансформаторного каскада усилителя мощности

которая обязательно должна замыкаться на эмиттер, поэтому исключить резистор R_2 , заменив его конденсатором (как это можно было сделать при использовании режима А) нельзя.

Обеспечить режим В можно без делителя R_1R_2 , соединив среднюю точку вторичной обмотки входного трансформатора с эмиттерами. Но при этом будет наибольший уровень искажений, возникающих из-за того, что при малых входных токах и напряжениях сопротивление эмиттерного перехода возрастает, что в свою очередь еще больше уменьшает входной и выходной токи. Для уменьшения искажений используют режим АВ, при котором неработающий транзистор полностью не закрывается, а напряжение на нагрузке определяется разностью токов, протекающих через транзисторы.

Порядок расчета каскада в режиме АВ следующий.

1) Определяют мощность переменного сигнала, которую должны отдавать транзисторы в нагрузку:

$$P'_n = \frac{P_n}{\eta_{тр}}$$

2) Определяют мощность рассеяния на коллекторе выбираемого (одного) транзистора:

$$P'_k = \frac{P'_n}{2\eta_t}$$

где η_t – к.п.д. транзистора, который при работе в двухтактной схеме в режиме В не может превышать 0,78; для режима АВ его принимают в пределах 0,55...0,65. Допустимая мощность транзистора должна быть больше P'_k

$$P_{доп} > P'_k$$

Максимально допустимое напряжение между выводами коллектора и эмиттера при разомкнутой цепи базы должно удовлетворять условию:

$$U_{кmax} < 2,2E_k$$

По найденным значениям P_k и $U_{кmax}$ выбирают транзисторы.

3) Строят семейство выходных характеристик выбранного транзистора (рис. 2.7). Определяют величину напряжения U_{min} , которое соответствует резкому изменению крутизны характеристик. Обычно U_{min} лежит в пределах 0,5...2В.

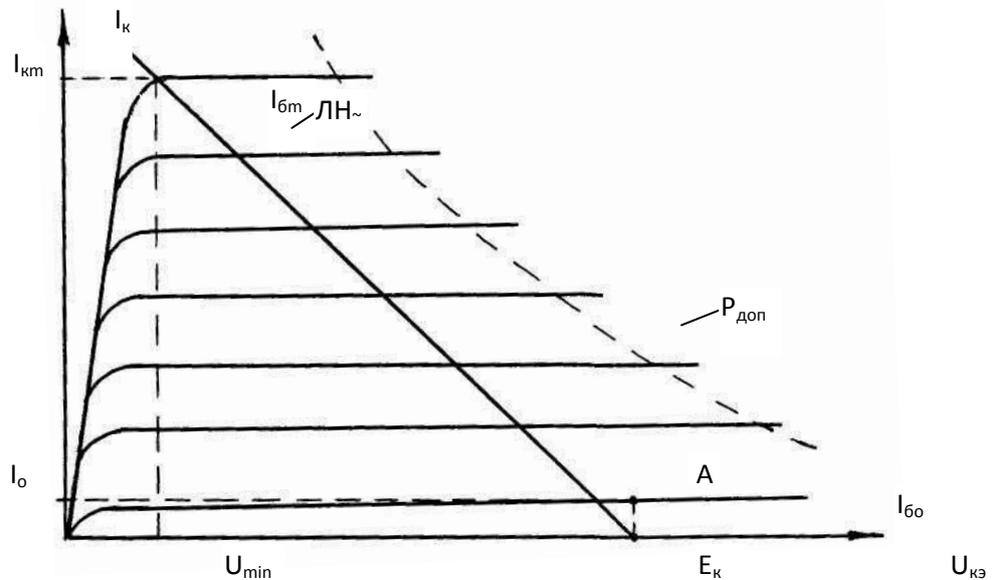


Рис. 2.7. Выходные характеристики выбранного транзистора

4) Пренебрегая падением напряжения, создаваемым током покоя, на первичной обмотке трансформатора Тр2, находят амплитуду напряжения на коллекторе каждого транзистора:

$$U_{км} = E_k - U_{мин}.$$

5) Вычисляют амплитуду переменной составляющей тока коллектора, необходимую для получения заданной мощности:

$$I_{км} = \frac{2P'_н}{U_{км}}.$$

6) Строят нагрузочную прямую одного плеча усилителя. Она пройдет через точки:

$$U_{кэ} = U_{мин}; I_k = I_{км}; \text{ и } U_{кэ} = E; I_k = 0.$$

7) С целью уменьшения нелинейных искажений ток покоя принимают $I_0 = (0,05...0,1)I_{км}$, но не менее $0,5...1\text{ мА}$ в случае транзисторов малой мощности. Этому току соответствует точка А на графике выходных характеристик. Нагрузочная прямая через эту точку не проходит, так как токи покоя в обоих транзисторах одинаковы, они протекают по двум полуобмоткам выходного трансформатора, их разность равна нулю, поэтому они не влияют на магнитный поток трансформатора. Линия нагрузки по переменному току дает нам амплитуды переменной составляющей напряжения в цепи коллектора $U_{км}$ и тока в этой же цепи $I_{км}$, которые вырабатываются двумя транзисторами, рассматриваемыми как единое целое.

8) Постоянную составляющую коллекторного тока двух транзисторов, протекающую через источник питания определяют по формуле:

$$I_{п} = 0,635[I_{км} + I_0(\pi - 1)].$$

9) Мощность, потребляемая каскадом от источника питания:

$$P_{потр} = E_k I_{п}.$$

10) Мощность, рассеиваемая на коллекторах двух транзисторов:

$$P_{кч} = P_{потр} - P'_н,$$

на каждом из транзисторов $P_к = \frac{P_{кч}}{2}$.

В п. 2. настоящего расчета эта мощность была определена ориентировочно, что было необходимо для выбора транзистора. Вычислив $P_к$, необходимо проверить выполнение условия:

$$P_к < P_{доп}.$$

Если это условие не выполняется, необходимо выбрать более мощные транзисторы, или предусмотреть радиаторы для повышения теплоотдачи коллекторов.

11) Фактический к.п.д. транзисторов:

$$\eta_т = \frac{P'_н}{P_{потр}},$$

фактический к.п.д. каскада

$$\eta_к = \frac{P'_н}{P_{потр}}.$$

12) Сопротивление нагрузки одного плеча каскада (входное сопротивление трансформатора)

$$R'_н = \frac{U_{км}}{I_{км}}.$$

13) Коэффициент трансформации между половиной первичной обмотки и вторичной обмоткой выходного трансформатора

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{\eta_{тр} R'_н}{R_н}}.$$

14) Для определения входных параметров каскада, которые потребуются для расчета предыдущего каскада усилителя, необходимо воспользоваться входной характеристикой выбранных транзисторов, полученной при напряжении $U_{кэ}$, отличном от нуля (рис. 2.8). На эту характеристику необходимо нанести точки, соответствующие значениям $I_{б0}$ и $I_{бм}$, взятым с выходных характеристик, затем определить соответствующие этим токам напряжения между эмиттером и базой $U_{б0}$ и $U_{бм}$.

15) Среднее динамическое входное сопротивление транзисторов

$$R_{вх ср} = \frac{U_{бм} - U_{б0}}{I_{бм} - I_{б0}}.$$

16) Входная мощность, потребляемая каскадом (на оба плеча)

$$P_{вх} = \frac{U_{бм} I_{бм}}{2}.$$

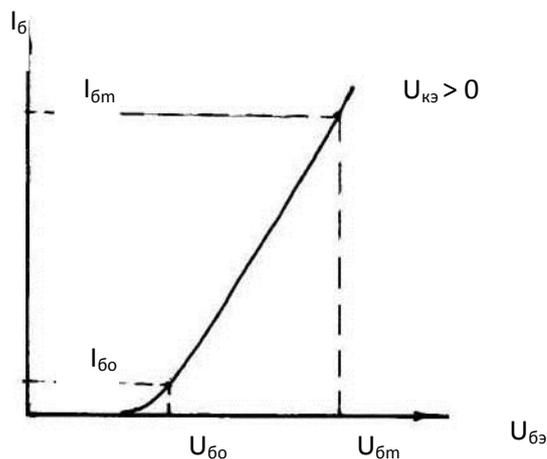


Рис. 2.8. Входные характеристики выбранного транзистора

17) Общее сопротивление делителя

$$R_1 + R_2 = \frac{E_k}{I_{дел}} = \frac{E_k}{10I_{бm}};$$

$$\text{сопротивление } R_2 = \frac{U_{б0}}{I_{дел}} = \frac{0,1U_{б0}}{I_{бm}}.$$

2.4. Расчет двухтактного безтрансформаторного каскада усилителя мощности.

В рассматриваемых выше выходных каскадах используются трансформаторы, что является их недостатком, так как трансформаторы увеличивают габариты и массу усилителей, увеличивают их стоимость, а также создают дополнительные потери мощности.

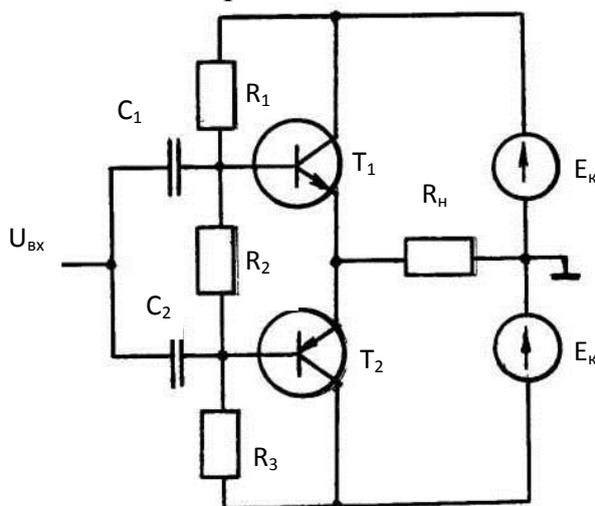


Рис. 2.9. Схема электрическая принципиальная двухтактного безтрансформаторного каскада усилителя мощности

Построение безтрансформаторных усилителей мощности возможно с использованием транзисторов разных типов (n-p-n и p-n-p). Схема такого усилителя представлена на рис. 2.9.

Транзисторы T_1 и T_2 работают в классе АВ, что обеспечивается смещением, создаваемым сопротивлением резистора R_2 . Потенциал в средней точке R_2 должен быть равен нулю, тогда смещение на базе транзистора T_1 будет $0,5I_d R_2$, а на базе транзистора T_2 $-0,5I_d R_2$,

$$\text{где } I_d = \frac{2E_k}{R_1 + R_3} - \text{ток делителя напряжения.}$$

При вычислении этого тока сопротивление R_2 можно не учитывать, так как оно во много раз меньше R_1 и R_3 . На практике для обеспечения нулевого потенциала середины R_2 осуществляется изменением сопротивлений R_1 и R_3 (одно из них должно быть подстроечным).

Конденсаторы C_1 и C_2 являются разделительными для поступления сигнала с выхода предыдущего каскада. Их емкостное сопротивление для низшей усиливаемой частоты должно быть значительно ниже суммы сопротивлений ($r_{эб} + R_n$), то есть входного сопротивления каскада.

Ввиду того, что нагрузка включена в цепь эмиттеров, напряжение на нагрузке будет равно напряжению усиливаемого сигнала, то есть каскад работает в режиме эмиттерного повторителя, усиливая ток.

Если правильно настроено смещение транзисторов, то при отсутствии входного сигнала ток в нагрузке будет отсутствовать, а через транзисторы будет протекать небольшой ток, определяемый величиной смещения и напряжением источника питания.

При подаче переменного входного сигнала поочередно будут открываться транзисторы T_1 и T_2 , обеспечивая в цепи нагрузки переменный ток.

Расчет каскада выполняется следующим образом.

1) по заданным значениям P_n и R_n определяем действующее и максимальное значения тока нагрузки

$$I_n = \sqrt{\frac{P_n}{R_n}}, \quad I_{\text{км}} = \sqrt{2}I_n.$$

2) Определяем величину э.д.с. источника питания

$$E_k = I_{\text{км}} R_n.$$

3) Выбираем транзисторы по величине допустимых параметров.

Допустимая мощность, рассеиваемая коллектором

$$P_{\text{кдоп}} > \frac{P_n}{2\eta_k}.$$

Теоретический к.п.д. двухтактного каскада с транзисторами в режиме А равен $\pi/4=0,78$. С учетом того, что транзисторы в данном случае работают в режиме АВ, η_k можно принять в пределах $0,65 \dots 0,7$.

Допустимый ток коллектора

$$I_{\text{к доп}} > I_{\text{к max}}$$

Допустимое напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{кэ\max} > 2E_{к}$.

4) Принимаем минимальный ток коллектора (при отсутствии входного сигнала)

$$I_{к\min} = 0,1I_{км} \text{ и вычисляем минимальный ток базы } I_{б\min} = \frac{I_{к\min}}{\beta}, \text{ принимая}$$

минимальное для выбранного типа транзисторов β .

5) Определяем величину сопротивлений R_1 и R_3 , принимая ток делителя $I_{д} = (8...10)I_{б\min}$.

$$R_1 = R_3 = \frac{E_{к}}{I_{д}}.$$

6) Определяем необходимое смещение напряжения на базе

$$U_{бэ} = I_{б\min} r_{вх}.$$

$r_{вх}$ определяем по входным характеристикам транзисторов.

7) Определяем сопротивление резистора R_2 .

$$R_2 = \frac{U_{бэ}}{I_{д}}.$$

Емкость конденсаторов C_1 и C_2 находим исходя из соотношения

$$X_{C1} = X_{C2} = \frac{1}{\omega_{\min} C} = (0,01...0,05)R_{н}.$$

2.5. Расчет усилителя прямоугольных импульсов

При мощности выходного сигнала генератора импульсов, не достаточного для питания нагрузки, на его выходе необходимо установить усилитель мощности.

В усилителях прямоугольных импульсов транзисторы работают в режиме «D», т.е. в процессе работы находятся или в области насыщения (полностью открыты), или в области отсечки (полностью закрыты). Расчет может быть выполнен в следующем порядке и с соблюдением следующих условий.

1) Выбирают транзисторы по величине допустимого напряжения и тока. Амплитуда импульса тока, протекающего в цепи нагрузки не должна превышать паспортного допустимого импульсного тока. Кроме того, следует проверить, чтобы среднее за период значение тока (для сигналов прямоугольной формы среднее значение тока равно действующему значению) не превышало длительно допустимый ток для выбираемого транзистора. Среднее значение тока определяют по формуле:

$$I = (I_{и} t_{и} + I_{п} t_{п}) / (t_{и} + t_{п}), \text{ где:}$$

$I_{и}$, $I_{п}$ – токи во время импульса и во время паузы, соответственно;

$t_{и}$, $t_{п}$ – длительность импульса и длительность паузы, соответственно.

2) Выбрав транзистор, следует определить ток базы, достаточный для надежного перевода транзистора в состояние насыщения. Этот ток определяют по формуле:

$$I_6 = (1,5 \dots 2) * I_H / \beta_{\min},$$

где: I_H – расчетный ток нагрузки,

β_{\min} – минимальное значение статического коэффициента усиления тока базы для выбранного транзистора.

Если вычисленное значение тока базы выше тока, допустимого для выходного устройства генератора (это может быть операционный усилитель, логический элемент или триггер), то следует использовать составной транзистор. В этом случае статический коэффициент усиления базового тока будет равен произведению статических коэффициентов двух транзисторов.. Допустимый ток коллектора дополнительного транзистора должен быть больше тока базы основного транзистора.

3) Если при усилении выходного сигнала генератора требуется усиление только тока, то нагрузку включают в цепь эмиттера. В этом случае входное сопротивление усилителя за счет глубокой отрицательной обратной связи по напряжению достаточно высоко, и в цепь базы не требуется включать сопротивление, ограничивающее ток базы.

4) Если требуется усиление, как тока, так и напряжения выходного сигнала генератора, то в цепь базы требуется включать сопротивление, ограничивающее ток до величины, допустимой для выходного устройства генератора импульсов. При расчете этого сопротивления следует учитывать статическое сопротивление перехода база-эмиттер, которое определяют по входным характеристикам выбранных транзисторов.

5) Для усиления однополярных импульсов используют однотактные усилители, схемы которых представлены на рис. 2.10.

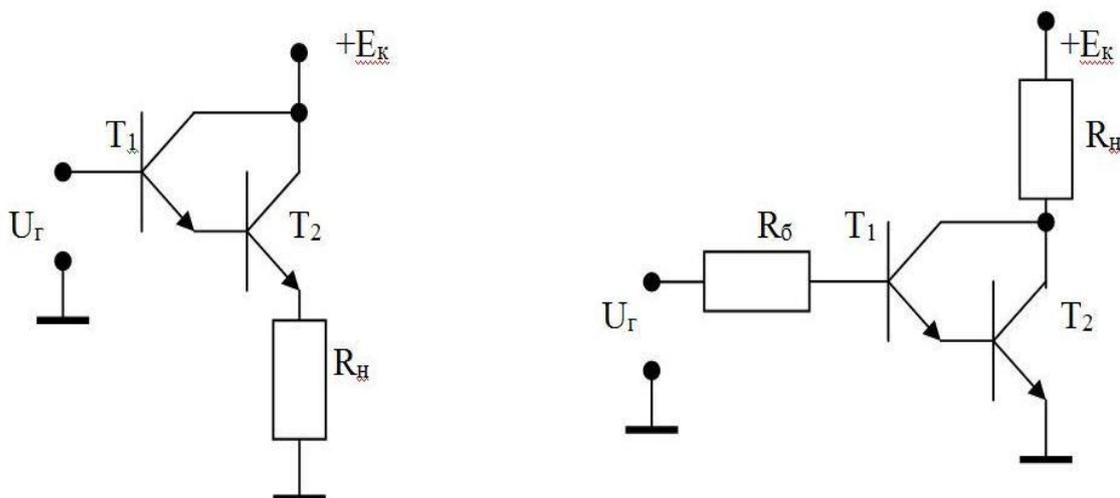


Рис. 2.10. Схемы электрические принципиальные однотактных усилителей однополярных импульсов

б) Для усиления двухполярных импульсов необходим двухтактный усилитель. Если напряжение выходных импульсов генератора менее необходимого для питания нагрузки, то усилить его до 10...15В проще всего, применив операционный усилитель. Для усиления тока может быть использован двухтактный усилитель, схема которого представлена на рис. 2.11. При необходимости в этой схеме также могут быть использованы составные транзисторы.

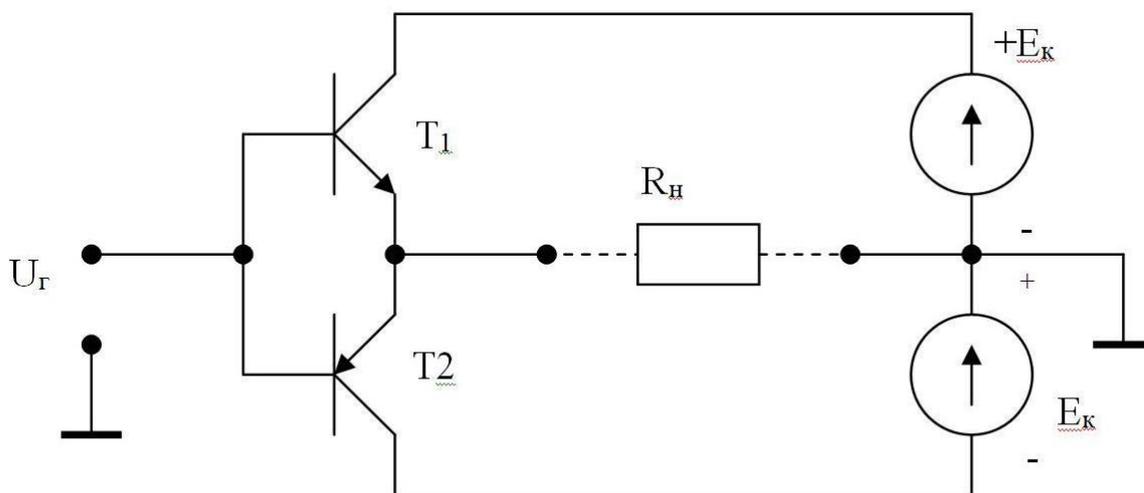


Рис. 2.11. Схема электрическая принципиальная двухтактного усилителя двухполярных импульсов

7) Если генератор прямоугольных импульсов используется для подключения различных внешних нагрузок, и не исключена возможность подключения нагрузки, сопротивление которой ниже допустимого, то желательно предусмотреть защиту от токов перегрузки. Для осуществления этой защиты в цепь нагрузки включают небольшое сопротивление $R_{ш}$, величина которого не должна превышать нескольких процентов от минимально допустимого сопротивления нагрузки

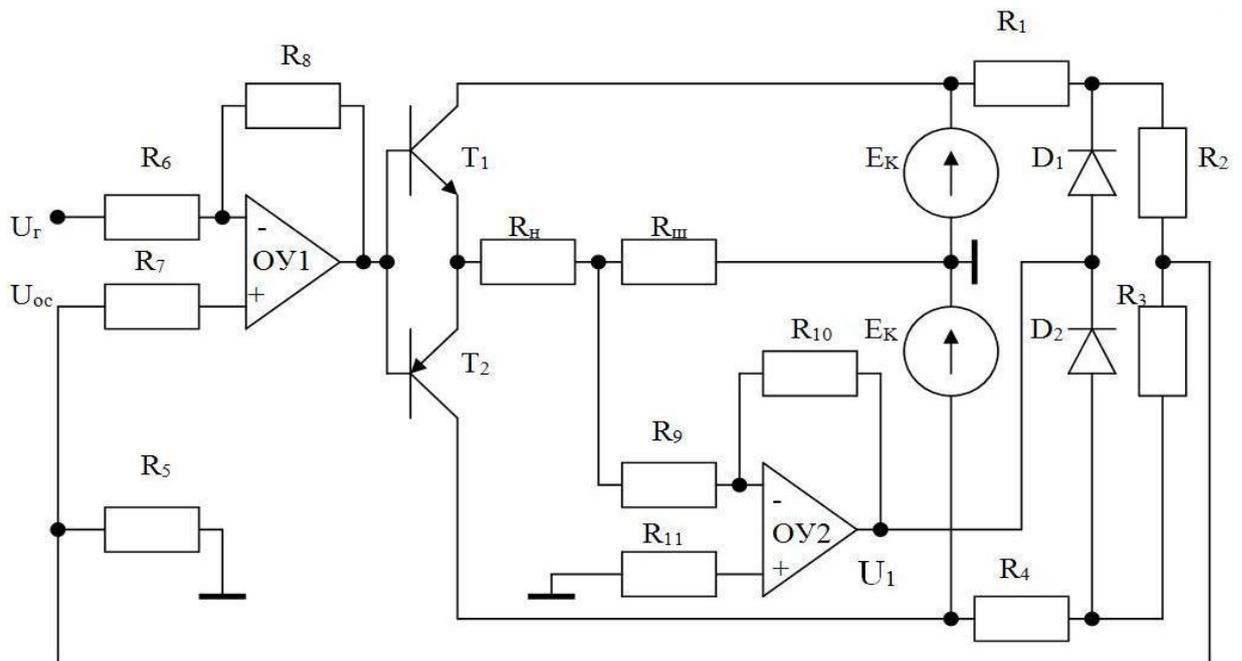


Рис. 2.12. Схема электрическая принципиальная защиты от токов перегрузки

Напряжение $U_{ш}$, снимаемое с этого сопротивления и пропорциональное току нагрузки, используется в цепи глубокой отрицательной обратной связи с отсечкой. Схема защиты от токов перегрузки представлена на рис. 2.12.

Поскольку напряжение $U_{ш}$ при малом сопротивлении $R_{ш}$ будет составлять доли вольта, что не достаточно для отпириания диодов даже в проводящем направлении, оно усиливается усилителем ОУ2, включенным по реверсивной схеме (т.е. полярность напряжения на его выходе противоположна полярности входного напряжения). В схеме отсечки используется делитель напряжения R_1 - R_2 - R_3 - R_4 , на сопротивлениях которого R_2 и R_3 устанавливают опорное напряжение $U_{оп}$. Это напряжение при допустимых токах нагрузки больше напряжения U_1 , снимаемого с выхода усилителя ОУ2. При $|U_1| < U_{оп}$ диоды D_1 и D_2 закрыты и через резистор R_5 ток не протекает как при положительной полуволне выходного напряжения генератора, так и при отрицательной, напряжение обратной связи U_{oc} равно нулю. Как только U_1 по абсолютному значению станет выше $U_{оп}$ (а это будет при токах нагрузки, превышающих наибольший допустимый), по сопротивлению R_5 потечет ток, и на нём появится напряжение $U_{oc} = U_1 - U_{оп}$ соответствующей полярности. Полярность U_{oc} будет такая же ,как на выходе генератора $U_{Г}$, но подаётся оно на неинверсный вход, поэтому появление напряжения U_{oc} на входе операционного усилителя ОУ1 снизит напряжение на его выходе и, соответственно, напряжение на нагрузке. При коротком замыкании в цепи нагрузки напряжение на сопротивлении $R_{ш}$ должно быть таким, чтобы ток, протекающий через него был не выше тока, допустимого для выбранных транзисторов T_1 и T_2 .

Порядок расчета цепей защиты следующий

1) Сопротивление шунта следует принять не более 1...2% от сопротивления нагрузки:

$$R_{ш} = (0,01 \dots 0,02) R_{н}.$$

2) Ввиду того, что падение напряжения на шунте при максимальном расчетном токе $I_{расч макс} = P_{н}/R_{н мин}$, как правило, по величине не достаточно для отпириания диодов даже при отсутствии опорного напряжения, его необходимо увеличить с помощью операционного усилителя до 2...5В:

$$U_1 = (R_{10}/R_9) R_{ш} I_{расч макс}.$$

3) Опорное напряжение должно быть меньше напряжения U_1 на величину падения напряжения на диоде, которое следует взять из паспортных данных для выбранного диода

(диоды выбирают по допустимому напряжению, которое должно быть больше напряжения источника питания, допустимый ток диодов может быть минимальным, т.к. они находятся во входной цепи операционного усилителя):

$$U_{оп} = U_1 - \Delta U_{диода}$$

4) По величине опорного напряжения выполняется расчет сопротивлений делителя напряжения $R_1 R_2 R_3 R_4$. Ток делителя $I_{д}$ можно принять достаточно малым, порядка 1мА, сопротивление одного плеча делителя:

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4 = E_{к}/I_{д}$$

5) Сопротивление резисторов, с которых снимается опорное напряжение:

$$R_2 = R_3 = U_{оп}/I_{д}.$$

6) При коротком замыкании в цепи нагрузки ток не должен превышать значения, допустимого для выбранных транзисторов, его можно принять на 15...20% больше $I_{расч макс}$:

$$I_{кз} = (1,15 \dots 1,2) I_{расч макс}.$$

7) При токе короткого замыкания на сопротивлении R_5 будет падать напряжение:

$$U_{ос} = R_{ш} (R_{10}/R_9) I_{кз} - U_{оп} - \Delta U_{диода},$$

этого напряжения должно быть достаточно для снижения напряжения на выходе ОУ1, следовательно, и в цепи нагрузки, до значения $I_{кз} R_{ш}$. Исходя из этого условия рассчитывается коэффициент усиления усилителя ОУ1 по входу R_7 .

8) Наибольший ток короткого замыкания соответствует максимальному напряжению на выходе усилителя мощности $U_{мах}$, поэтому снижение напряжения за счет сигнала обратной связи должно составить $U_{мах} - R_{ш} I_{кз}$, Это напряжение будет равно:

$$U_{ос} R_8 / R_7, \text{ отсюда} \\ R_7 = U_{ос} R_8 / (U_{мах} - R_{ш} I_{кз}).$$

9) Сопротивление резистора R_5 можно принять достаточно большим, порядка 100 кОм, учитывая то, что входной ток операционного усилителя не превышает 1 мкА.

3. Генераторы прямоугольных импульсов на операционных усилителях.

Схемы генераторов могут быть построены на базе триггеров, логических элементов, операционных усилителей. В данной контрольной работе необходимо выполнить расчёт генератора на базе операционного усилителя.

3.1. Расчёт автогенератора прямоугольных импульсов.

Схема простейшего автогенератора прямоугольных сигналов приведена на рис. 3.1.

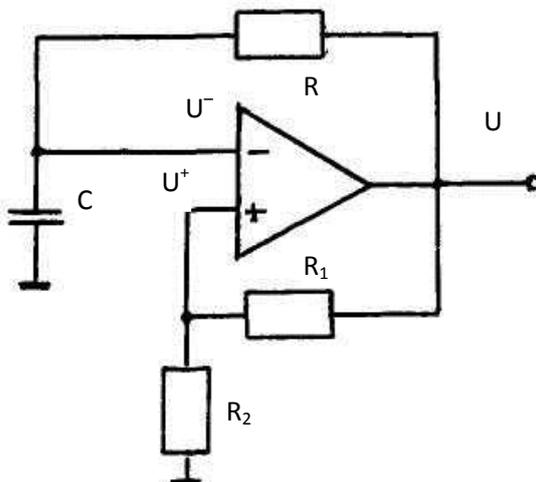


Рис.3.1 Схема электрическая принципиальная простейшего автогенератора прямоугольных сигналов

Операционный усилитель имеет безынерционную положительную связь, которая обеспечивается делителем R_1R_2 и инерционную отрицательную, выполненную резистором R и конденсатором C .

Рассмотрим режим автоколебаний этого генератора.

Пусть в момент времени $t = 0$ (рис. 3.2) включаются источники питания ОУ и выходное напряжение начинает возрастать, тогда через делитель R_1R_2 увеличивается напряжение U^+ , напряжение U^- вследствие наличия конденсатора в цепи обратной связи растёт постепенно. Вследствие увеличения U^+ нарастание напряжения U протекает лавинообразно, оно скачкообразно возрастает до напряжения насыщения E , а входное U^+ до

$$U_R = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \gamma E.$$

Напряжение U^- в процессе заряда конденсатора растет по экспоненте, стремясь к значению E , но как только оно незначительно превысит U_R , напряжение на выходе ОУ скачкообразно изменится до значения $-E$, после чего конденсатор начнет перезаряжаться, то есть напряжение U^- станет уменьшаться по экспоненте, стремясь к значению $-E$, а напряжение U^+ в процессе перезаряда конденсатора будет оставаться постоянным, равным $-\gamma E$. Как только U^- станет по абсолютному значению меньше U^+ , напряжение на выходе ОУ скачком изменится до $+E$. Далее процесс будет периодически повторяться.

Первый импульс будет иметь меньшую длительность, поскольку он сформируется при заряде конденсатора от 0 до U_R .

$$U^-(t) = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right),$$

где $\tau = RC$, в момент переключения $U^-(t) = U_R = \gamma E$, то есть при $t = t_1$.

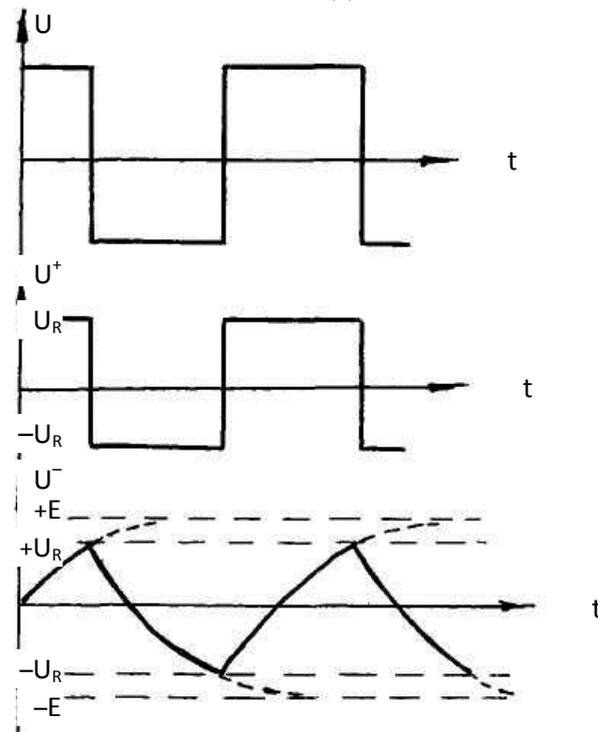


Рис 3.2. Эпюры выходного напряжения, напряжения на компараторе и конденсаторе

$$\gamma E = E \left(1 - e^{-t_{н1}/\tau} \right), \text{ откуда длительность первого импульса}$$

$$t_{н1} = \tau \ln \frac{1}{1 - \gamma}.$$

При генерации последующих импульсов конденсатор перезаряжается от напряжения $U_R = \gamma E$ одной полярности, стремясь зарядиться до напряжения E противоположной полярности, то есть процесс перезарядки протекает по закону:

$$U^-(t) = (E + \gamma E) \left(1 - e^{-t/\tau} \right) - \gamma E,$$

процесс перезарядки прекращается при $U(t) = \gamma E$, откуда длительность последующих импульсов будет

$$t_{и} = \tau \ln \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma},$$

период следования импульсов $T = 2t_{и}$. Сквозность сигнала $\frac{T}{t_{и}} = 2$.

При необходимости увеличения сквозности в цепь заряда конденсатора включают не одно сопротивление, а два, последовательно с диодами, как это показано на рис. 3.3. В этом случае время заряда конденсатора до $+U_R$ будет определяться постоянной времени $\tau_1 = R3C$, а время разряда – постоянной времени $\tau_2 = R4C$.

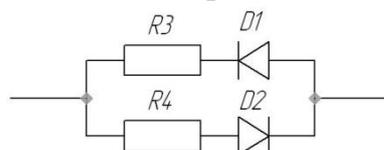


Рис. 3.3. Схема электрическая принципиальная цепи заряда конденсатора

Следует иметь в виду, что при расчете данного генератора γ нельзя принимать больше 0,3, так как с увеличением γ растет максимальный дифференциальный сигнал, на входе усилителя (который равен $2 U_R$), и при $\gamma > 0,3$ он принимает значения, превышающие допустимые.

Используя описание работы генераторов, студенты должны самостоятельно определить методику их расчёта.

Рекомендуемая литература

1. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. Электроника. Изд. «Феникс» 2014 г.