

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Л.И. Шарыгина

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания к курсовому проектированию  
по дисциплине  
«Схемотехника аналоговых электронных устройств»

Томск  
2025

УДК 621.37(072)  
ББК 32.84  
Ш25

**Рецензенты:**

*Г.Н. Якушевич*, кандидат технических наук доцент  
*А.А. Мещеряков*, кандидат технических наук доцент

**Шарыгина, Людмила Ивановна**

Ш26 Проектирование аналоговых электронных устройств : методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств». – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 30 с.

Даются рекомендации по выполнению курсового проекта по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств» студентами радиотехнических специальностей вузов. Содержатся указания по расчету усилителей на биполярных транзисторах с оценкой и анализом результатов при построении макета в среде Electronics Workbench.

Для студентов радиотехнических специальностей.

Одобрено на заседании кафедры радиотехнических систем, протокол № 8 от 07.02.2025

УДК621.37(072)  
ББК32.84

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Задачи курсового проектирования .....	4
2. Этапы курсового проектирования .....	5
3. Техническое задание.....	6
4. Порядок проектирования.....	8
4.1. Проектирование усилителей переменного тока .....	8
4.2. Проектирование усилителей постоянного тока прямого усиления.....	10
5. Расчет регулировок усиления .....	14
6. Содержание пояснительной записки.....	16
7. Защита курсового проекта.....	17
Литература .....	18
Приложение А (обязательное). Измерение параметров биполярного транзистора в среде Workbench .....	19
Приложение Б (обязательное).Измерение высокочастотных параметров транзистора .....	22
Приложение В (обязательное).Список формул, которые могут быть полезными при расчетах.....	28
Приложение Г. План работы по первой части проекта.....	29

## 1. ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовое проектирование является составной частью курса «Схемотехника», осваиваемого студентами радиотехнического факультета ТУСУРа. При работе над курсовым проектом перед студентами ставятся следующие задачи:

- *Систематизация, закрепление и углубление теоретических знаний по курсу.*
- Расширение круга знаний путем изучения государственных стандартов, справочников и другой специальной и нормативной литературы.
- Развитие творческой инициативы при самостоятельном решении поставленных задач и поиска оригинальных решений.
- Ознакомление с практическими задачами и современными научно-техническими решениями при проектировании аналоговых (усилительных) устройств.
- Развитие навыков систематического, технически и литературно грамотного изложения материала, убедительного обоснования принятых решений.
- *Развитие чувства ответственности за выполненную работу и принятые решения.*
- *Развитие навыков оформления технической документации.*
- *Выработка первичных навыков защиты принятого технического решения.*

## 2. ЭТАПЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовое проектирование по дисциплине «Схемотехника АЭУ» (вариант – расчет + симуляция) состоит из двух этапов:

1. Проектирование усилителя, соответствующего исходным данным: заданы нагрузка, полоса пропускания и требуемое выходное напряжение.

При проектировании усилителя постоянного тока основной является разработка карты напряжений на основе выбранных режимов работы транзисторов.

2. Выполнение индивидуального исследования.

Все выполненные расчеты подтверждаются симуляцией в среде Electronics Workbench.

По результатам выполненной работы составляются пояснительная записка и презентация, необходимая для защиты.

Допущенный к защите проект защищается в комиссии.

### ***Первый этап – проектирование***

Проектирование следует начинать с анализа технического задания (ТЗ). В результате анализа ТЗ студент должен полностью уяснить поставленную задачу, понять смысл всех технических характеристик и оценить объем и содержание предстоящей работы.

Задача первого этапа – не только выполнить необходимые расчеты, но и научиться планировать работу с последующей оценкой ее результатов. Поэтому далее (Приложение Г) приводится пример планирования работы на этом этапе, с тем чтобы, пройдя его, студент был готов самостоятельно выполнить второй этап – индивидуальное расчетное задание.

На первый взгляд приведенный план кажется слишком простым и излишне подробным, но практика показала, что именно такое пошаговое планирование необходимо и не так-то легко дается при выполнении.

И на первом, и далее на втором этапах необходимо выполнить расчеты, результаты которых проверяются симуляцией (компьютерным моделированием). Для выполнения расчетов необходимо знать параметры используемого транзистора в рабочей точке. Методика измерения параметров изложена в Приложениях А–В. При этом не обязательно строить графики зависимости параметров транзистора от режима. Достаточно измерить параметры в выбранной рабочей точке.

### ***Второй этап – выполнение индивидуального задания***

На втором этапе студенты рассматривают теоретические аспекты индивидуального задания и составляют план расчетов и моделирования.

Этот план исследований одновременно является планом отчета о выполненной работе – пояснительной записки по курсовому проекту.

После выполнения задания обязательно делается заключение по выполненной работе с анализом результатов.

### 3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Курсовой проект выполняется в соответствии с выданным студенту техническим заданием. Техническое задание определяет электрические и тактико-технические показатели подлежащих разработке устройств.

Техническое задание является индивидуальным и выдается каждому студенту в начале проектирования. Задание составляется преподавателем – руководителем проектирования, оформляется на бланке формата А4 и утверждается заведующим кафедрой.

#### Примеры вариантов технических заданий

##### Задание 1

Соберите реостатный каскад на транзисторе (из списка 2N...), ток покоя 10 мА, сопротивление в цепи коллектора 1 кОм. Подключите пассивную регулировку усиления ко входу ( $R_{ген} = 100, 200, 500$  Ом при  $R_H = 1$  кОм), а затем к выходу усилителя ( $R_H = 100, 200, 500$  Ом при  $R_{ген} = 100$  Ом). Емкость нагрузки во всех случаях 100 пФ.

Сравните эффективность регулировок и их влияние на полосу пропускания.

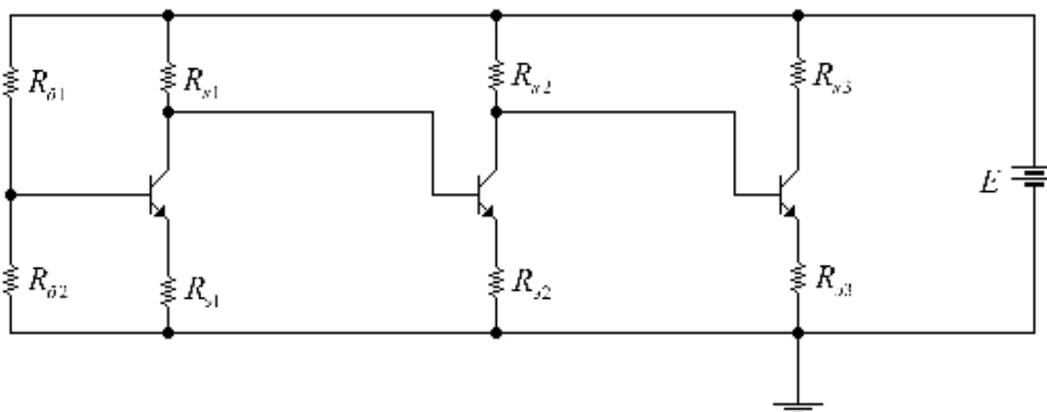
##### Задание 2

Рассчитайте двухкаскадный усилитель на транзисторах 2N2222. Амплитуда выходного напряжения на нагрузке 300 Ом составляет 4 В. Токи покоя транзисторов одинаковые. Соберите рассчитанный усилитель и сравните его характеристики с расчетными.

Методом подбора найдите сопротивление в цепи коллектора первого каскада, при котором обеспечивается наиболее широкая полоса пропускания усилителя (режим транзисторов и выходное напряжение остаются неизменными).

##### Задание 3

Соберите трехкаскадный усилитель постоянного тока., обеспечив выходное напряжение 3,5 В (транзисторы выберите из списка 2N...). Выходное напряжение снимается с коллектора.



Принципиальная схема трехкаскадного усилителя постоянного тока прямого усиления

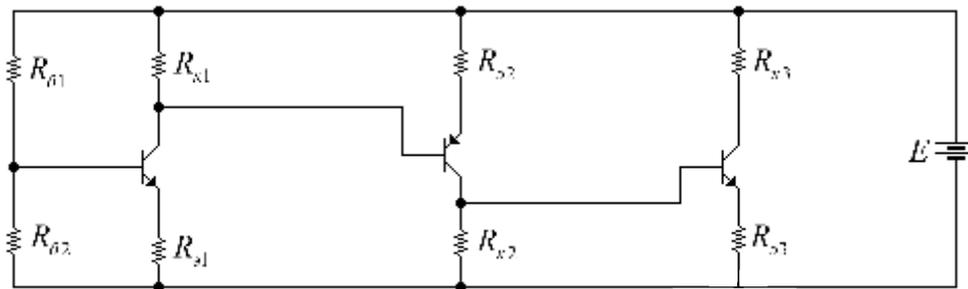
Обеспечьте одинаковый режим всех каскадов (для контроля режима включите в те цепи, где необходимы измерения, амперметры и вольтметры, настроенные на измерения на постоянном токе). Выберите напряжение питания не менее 20 В.

Составьте расчетную карту напряжений, а затем снимите ее для рассчитанной схемы.

Измерьте верхнюю граничную частоту входной, промежуточной и выходной цепей и всего усилителя. Проанализируйте полученные результаты.

#### Задание 4

Рассчитайте трехкаскадный усилитель постоянного тока на транзисторах 2N2907 и 2N2714, обеспечив выходное напряжение не менее 2,5 В. Потенциал входа и выхода по отношению к общему проводу на постоянном токе одинаков.



Принципиальная схема трехкаскадного усилителя постоянного тока

Выходное напряжение снимается с коллектора выходного каскада.

Режим всех каскадов одинаков (для контроля режима включите в те цепи, где необходимы измерения, амперметры и вольтметры, настроенные на измерения на постоянном токе). Выберите напряжение питания не менее 15В. Составьте расчетную карту напряжений, а затем снимите ее для рассчитанной схемы.

Замените каскады дифференциальными каскадами.

#### Задание 5

Рассчитайте двухкаскадный усилитель на транзисторах 2N2222 с тем, чтобы при выходном напряжении на 4 В на нагрузке 200 Ом и емкости 50 пФ обеспечить наибольшее усиление в полосе 1–10 МГц. Сопротивление источника сигнала 50 Ом.

Соберите рассчитанный усилитель и сравните его характеристики с расчетными.

Нагрузите усилитель фазоинверсным каскадом с эмиттерной связью. Ток покоя равен току покоя выходного каскада усилителя.

Исследуйте (расчетным путем и измерениями) влияние изменения сопротивлений нагрузки фазоинверсного каскада на полосу пропускания его входной и выходной цепей (рабочая точка остается неизменной, разделительные емкости по 10 мкФ.)

Сравните поведение плеч на нижних частотах.

#### Задание 6

На исследуемом транзисторе соберите двухкаскадный усилитель 2N3904 с тем, чтобы при выходном напряжении на 3 В на нагрузке 200 Ом и емкости 50 пФ обеспечить наибольшее усиление в полосе 1–10 МГц. Ток покоя второго каскада в два раза больше, чем ток покоя первого каскада.

Исследуйте АЧХ входной, промежуточной и выходной цепей.

Введите в первом каскаде эмиттерную коррекцию (без корректирующего конденсатора и при оптимальной коррекции) и повторите исследования АЧХ входной, промежуточной и выходной цепей.

## 4. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 4.1. Проектирование усилителей переменного тока

Если это не указано в задании, следует ориентировочно определить необходимое число каскадов (в процессе дальнейшего расчета возможны уточнения и изменения), сформулировать требования ко входу и выходу и распределить искажения между цепями.

Проектирование начинается с расчета выходного каскада, обеспечивающего заданное выходное напряжение. Далее следует обратиться к расчету входного каскада и входных цепей. Результаты расчета позволяют сформулировать требования к остальной части устройства и продолжить расчет.

#### Шаг первый

Расчет выходного каскада.

Начинать следует с выбора рабочей точки транзистора выходного каскада, учитывая требования задания – прежде всего необходимое выходное напряжение.

Следует задаться сопротивлением в цепи коллектора:

– если известна верхняя граничная частота выходной цепи,

$$R_k = \frac{R_{\text{экв}} \cdot R_H}{R_H - R_{\text{экв}}}, \quad R_{\text{экв}} \leq \frac{\tau_B}{(2 \div 3)C_H}, \quad \tau_B = \frac{1}{2\pi \cdot f_B};$$

– если верхняя граничная частота выходной цепи не ограничивает выбор сопротивления в цепи коллектора,

$$R_k \leq R_H \div (2-3)R_H.$$

После выбора сопротивления в цепи коллектора определяются эквивалентное сопротивление нагрузки, требуемый импульс тока и ток поя:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_k \cdot R_H}{R_k + R_H}, \quad i_{k\approx} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{экв}}}, \quad I_{k_0} = (1,1-1,3)i_{k\approx}.$$

Напряжение на коллекторе в рабочей точке ( $U_{k_0}$ ) выбирается из условия

$$U_{k_0} \geq (1-2) V + U_{\text{ВЫХ}},$$

но обычно не менее 5 В. чтобы не увеличивать емкость коллекторного перехода.

Для того чтобы обеспечить выбранную рабочую точку, определяются соответствующие ток и напряжение базы: при  $U_{k_0} = 5$  В и  $I_{k_0} = 19,8$  мА ток базы в рабочей точке  $I_{b_0} = 100$  мкА и напряжение на базе  $U_{b_0} = 0,713$  В (для примера взят транзистор 2N2222; рис. 4.1).

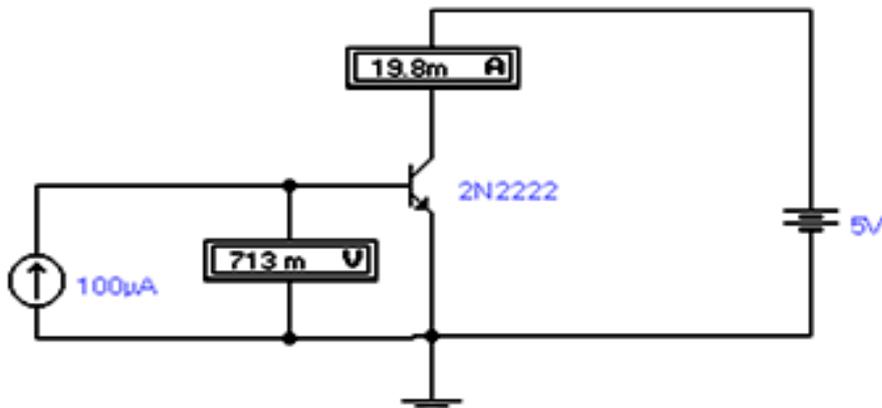


Рис. 4.1. Измерение параметров рабочей точки

При этом напряжение питания  $E = U_{\kappa_0} + I_{\kappa_0} \cdot R_{\kappa}$ ,  $R_{\kappa} = \frac{E - U_{\kappa_0}}{I_{\kappa_0}}$  (рис. 4.2).

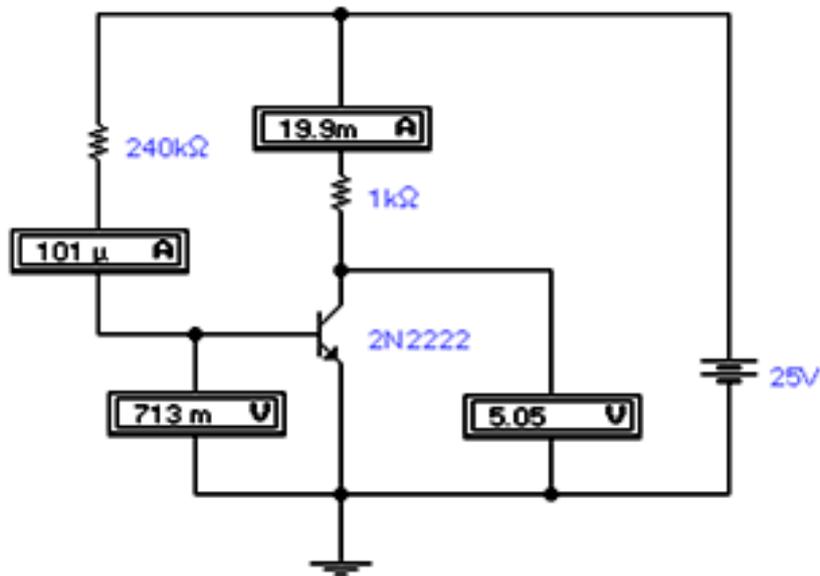


Рис. 4.2. Измерение параметров рабочей точки при наличии  $R_{\kappa}$

Убедитесь, что требуемый режим работы транзистора обеспечен. Подключив источник переменного напряжения, проверьте возможность обеспечения заданного выходного напряжения (рис. 4.3).

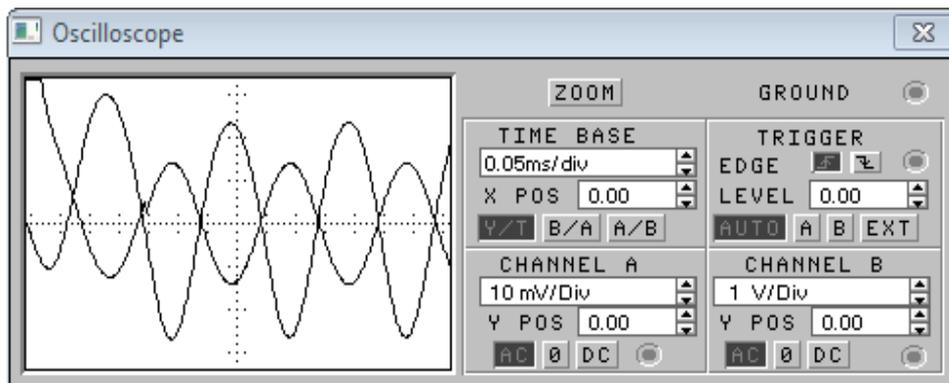
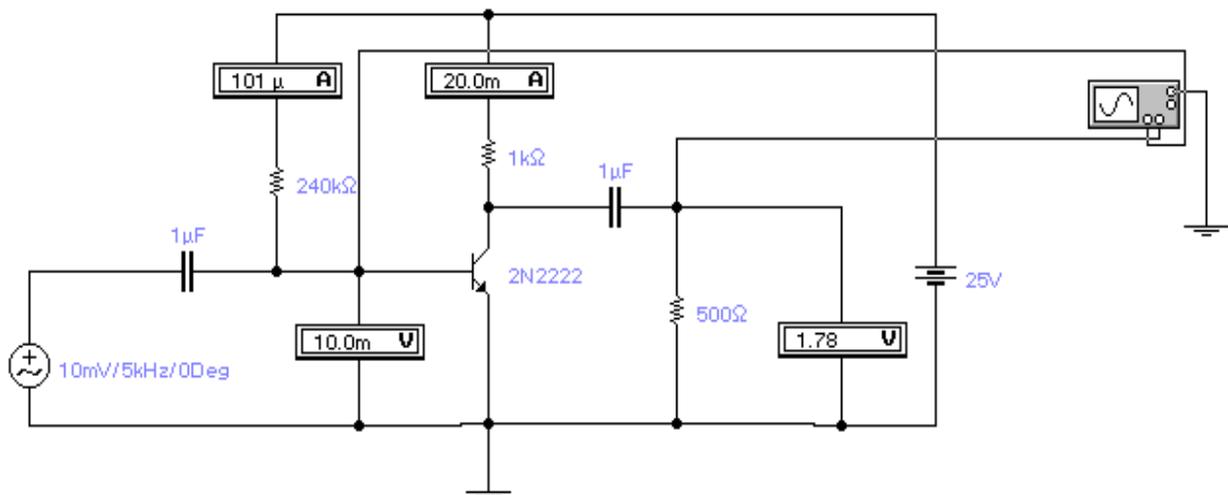


Рис. 4.3. Измерение параметров сигнала

*Следует отметить, что полученный результат не является окончательным. Дальнейший расчет может потребовать некоторой корректировки. Однако полученный навык облегчает дальнейшую работу.*

### ***Шаг второй***

После того как определено положение рабочей точки, следует определить параметры транзистора в ней (входное сопротивление  $R_{вх}$ , крутизну  $S$ , коэффициент передачи тока базы  $h_{21}$ , емкость коллекторного перехода  $C_{бк}$ , постоянную времени транзистора  $\tau$ ) и снять входную, проходную и желательно выходную характеристики.

На выходных характеристиках следует построить нагрузочные прямые и показать выходное напряжение.

Если ток покоя входного каскада отличается от тока покоя выходного, следует определить параметры транзистора входного каскада в рабочей точке.

### ***Шаг третий***

Измеренные параметры транзистора используются для расчета коэффициентов усиления (передачи) входной цепи, первого каскада и второго, а также для расчета верхних и нижних граничных частот этих цепей. Все результаты расчетов проверяются моделированием и сопоставляются с требованиями технического задания.

### ***Шаг четвертый***

Задание, как правило, предусматривает проектирование устройства, содержащего два-три каскада. Поэтому далее следует продолжить аналогичный расчет предварительных каскадов. Поскольку выходное напряжение каждого каскада уменьшится (при движении от выхода ко входу), ток покоя может быть взят меньше, чем выходного каскада.

Если ток покоя предыдущего каскада отличается от тока покоя выходного, следует определить параметры транзистора этого каскада в рабочей точке и повторить измерение параметров.

При расчете входного каскада оценивается входное сопротивление и его согласование с источником сигнала.

***Первые четыре шага являются общими для всех***, позволяя закрепить навыки по анализу цепей и проектированию.

Далее следует приступить к выполнению ***индивидуального задания***, составив предварительно его программу.

## **4.2. Проектирование усилителей постоянного тока прямого усиления**

Задачи проектирования усилителей постоянного тока прямого усиления несколько отличаются от задач проектирования усилителей переменного тока.

Особенностью усилителей постоянного тока прямого усиления является отсутствие разделительных емкостей. Это значит, что каскады нельзя рассчитывать независимо: режим предыдущего каскада зависит от режима следующего за ним каскада и наоборот. Кроме того, как правило, имеется сопротивление в цепи эмиттера, которое следует учитывать при расчете режима транзистора. В конечном счете требуется обеспечить нулевой потенциал постоянного напряжения на входе и выходе. Это позволяет исключить нарушение режима работы каскадов при подключении нагрузки и источника сигнала.

Только после выбора режимов работы выходного и входного каскадов возможен расчет промежуточных.

Допустим, выбирается сопротивление в цепи коллектора выходного каскада так, чтобы обеспечить заданное выходное напряжение. Пусть амплитуда выходного тока 20 мА. Чтобы обеспечить выходное напряжение, допустим 4 В, сопротивление в цепи коллектора должно быть 200 Ом (при данном рассмотрении считаем  $R_H \gg R_K$  и  $R_{экс} \approx R_H$ ). Если ток покоя коллектора  $I_{K_0} = (1,1-1,3)i_{кэ}$  и равен 25 мА, а  $U_{K_0} = 5$  В, напряжение питания  $E = U_{K_0} + I_{K_0} \cdot R_K$ , напряжение на базе (по проходной характеристике)  $U_{б_0} = 0,7$  В (рис. 4.4).

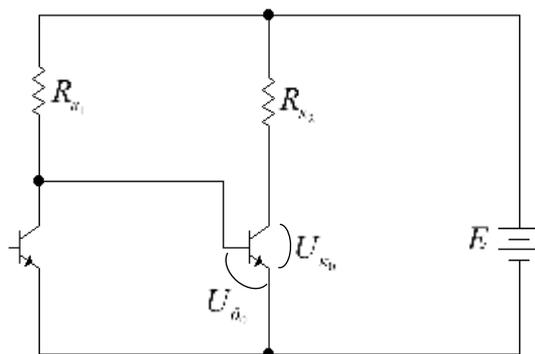


Рис. 4.4. Определение  $U_{б_0}$

При непосредственной связи между каскадами (отсутствует разделительная емкость) напряжения на коллекторе предыдущего каскада, равно  $U_{б_0}$  последующего, недостаточно для обеспечения его работы. Если принять, что напряжение на коллекторе предыдущего каскада равно, допустим 7 В, то для его получения необходимо поставить сопротивление в эмиттерную цепь выходного каскада (что и предусмотрено в задании), увеличив напряжение питания (рис. 4.5):

$$R_э = (U_{K_0} - U_{б_0_{ок}}) / (I_{K_0_{ок}} + I_{б_0_{ок}}),$$

$$E = U_{K_0_{ок}} + I_{K_0} \cdot R_K + R_э \cdot (I_{K_0_{ок}} + I_{б_0_{ок}}).$$

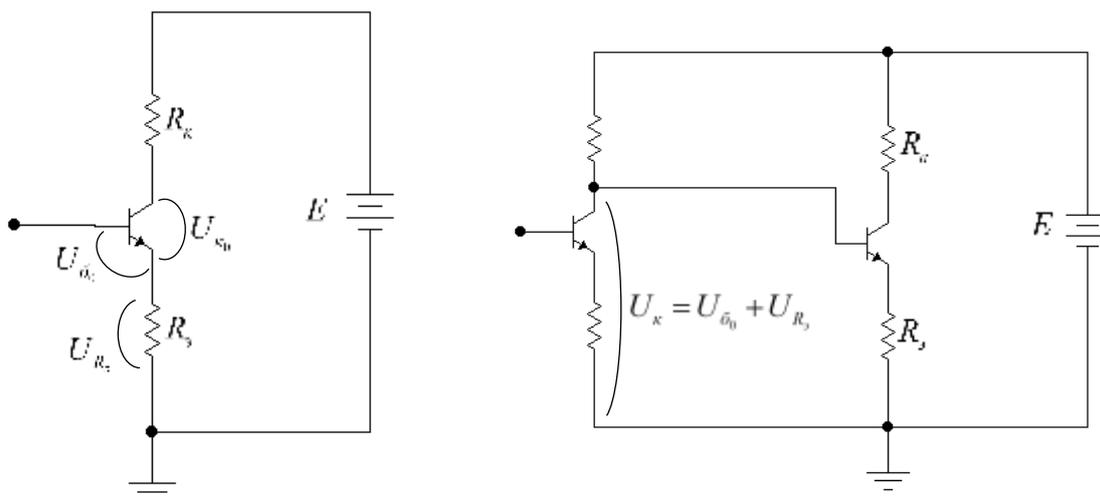


Рис. 4.5.  $U_{б_0}$  при наличии сопротивления в цепи эмиттера

Если требуется подключить еще один каскад, цепочка должна быть продолжена.

Из-за отсутствия разделительных емкостей в усилителях постоянного тока существует еще одна проблема – при подключении источника сигнала изменяется потенциал

базы по отношению к эмиттеру (смещается рабочая точка рассчитанная так, чтобы отвечать заданным требованиям). Чтобы исключить это явление, потенциал входа по отношению к общему проводу должен быть равен нулю, что может быть достигнуто при использовании двухполярного питания (рис. 4.6).

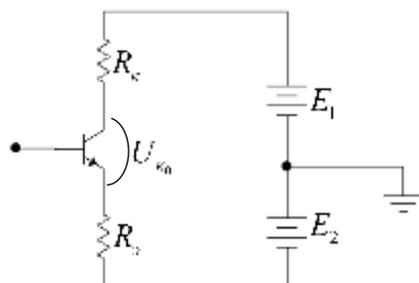


Рис. 4.6. Двухполярное питание каскада

Обычно двухполярные источники питания симметричны ( $E_1 = E_2$ ), что следует учитывать при выборе элементов схемы.

Схемы на рис. 4.7 численно демонстрируют сказанное выше.

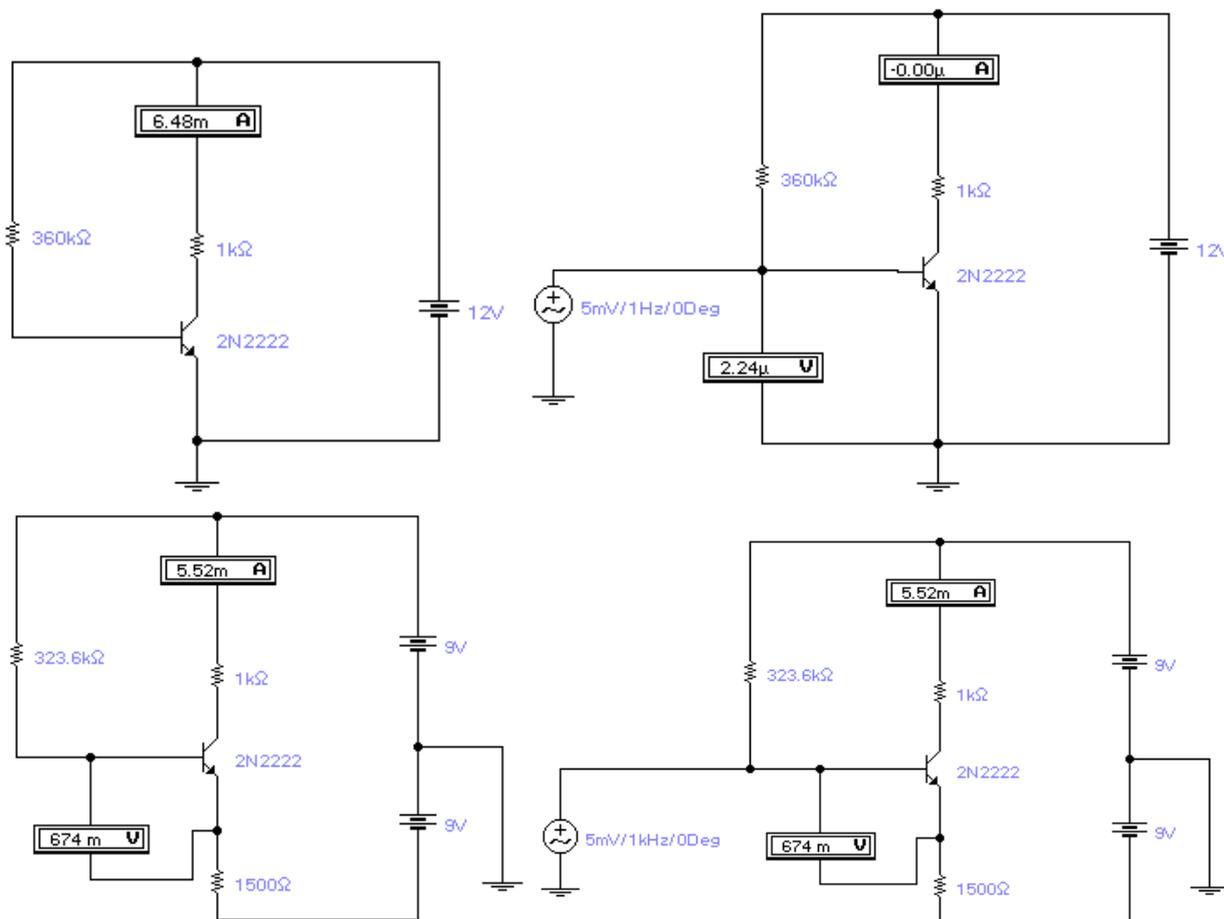


Рис. 4.7. Переход от однополярного питания к двухполярному

$$E = U_{k_0} + I_{k_0} \cdot R_k ;$$

$$U_k = U_{\text{oo}} + (I_{k_0} + I_{\text{oo}}) \cdot R_3 .$$

Режим работы транзистора изменяется и при подключении нагрузки (см. рис. 4.8).

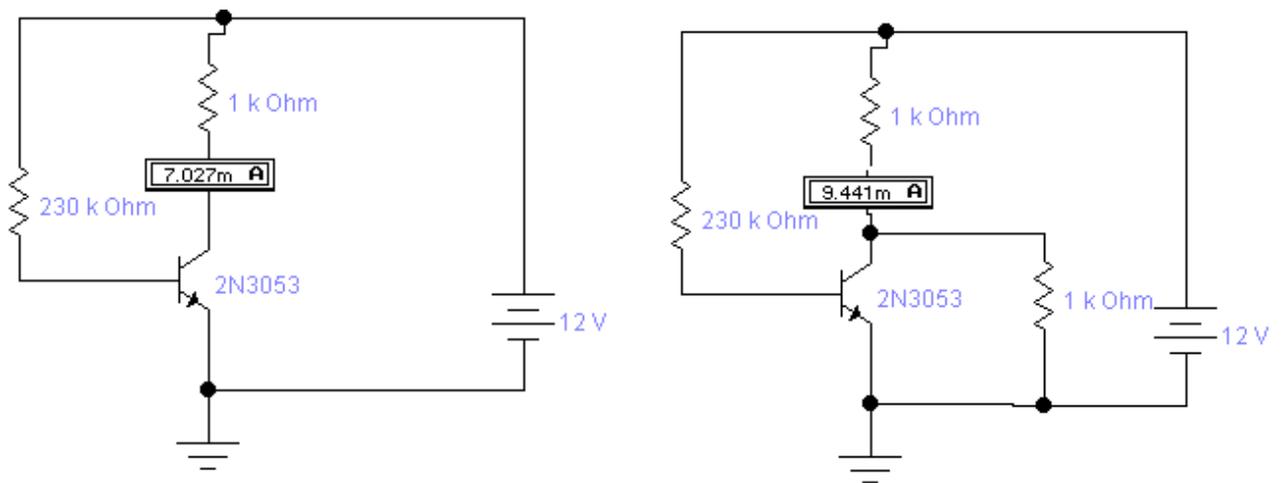


Рис. 4.8. Изменение режима транзистора (тока покоя) при подключении нагрузки

Если потенциал выхода по отношению к общему проводу равен нулю, подключение нагрузки не меняет режим транзистора, но питание обеспечивается при двухполюсном питании (рис. 4.9).

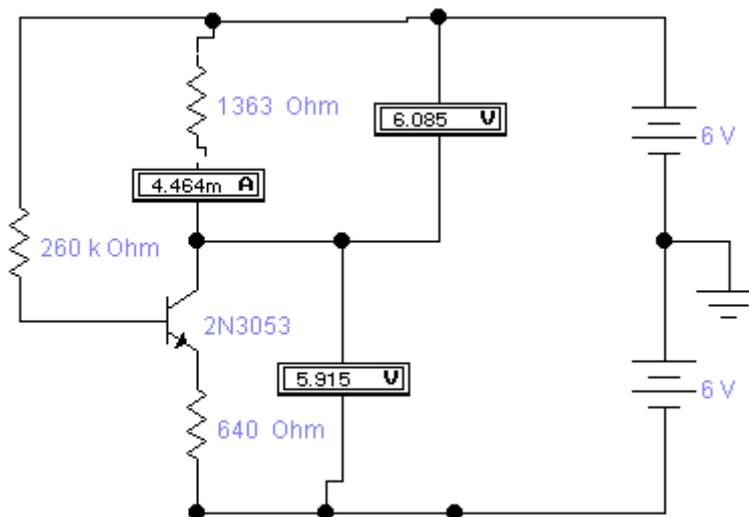


Рис. 4.9. Нулевой потенциал на выходе

В связи с описанным выше, проектирование целесообразно начать с расчета выходного каскада, обеспечивая нулевой потенциал выхода. Следующим рассчитывается входной каскад, обеспечивающий согласование с источником сигнала. Режим работы промежуточного каскада выбирается с учетом результатов этих расчетов. При наличии затруднений можно вернуться к началу расчета и скорректировать режимы входного и выходного каскадов.

## 5. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОК УСИЛЕНИЯ

Обычно техническое задание на проектирование усилителя содержит требование обеспечить регулировку усиления в заданных пределах. Если техническое задание не содержит такие требования, их следует сформулировать в процессе проектирования (обычно при анализе технического задания).

Для реализации этого требования применяют схемы плавной и ступенчатой (или обе вместе) регулировок усиления. Наиболее часто плавная регулировка осуществляется введением последовательной ООС по току (рис.5.1).

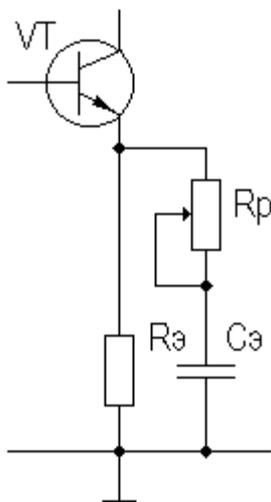


Рис. 5.1. Плавная регулировка усиления

Величину номинала регулировочного сопротивления можно определить из соотношения

$$R_p = \frac{D-1}{S_0},$$

где  $D$  – глубина регулировки, в относительных единицах.

Если значение  $D$  не задано, то необходимо определить требуемую глубину регулировки усиления, исходя из возможного изменения сигнала на входе и необходимого производственного запаса по коэффициенту усиления.

Возможно использовать пассивную регулировку усиления и регулировку усиления изменением режима одного из транзисторов [2, 3]

Ввиду того что, помимо коэффициента усиления, регулировки меняют и другие параметры каскада (входное сопротивление, полосу пропускания), следует учитывать это влияние при выборе места их включения.

При большой глубине регулировки ( $D > 20$ дБ) можно применять ступенчатую регулировку усиления Т- или П-типов (рис. 5.2) [3].

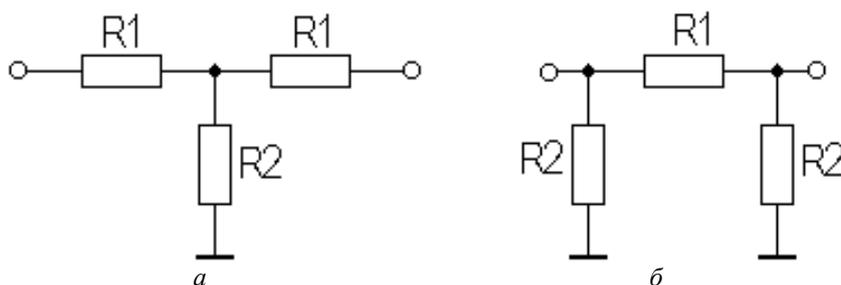


Рис. 5.2. Т-т П-образные симметричные аттенюаторы

Для П-образной схемы аттенюатора номиналы элементов определяются из следующих соотношений:

$$R_1 \approx \frac{R_0 \cdot (D+1)}{D-1},$$

$$R_2 \approx \frac{R_0 \cdot (D^2 - 1)}{2 \cdot D}.$$

Номиналы Т-образной схемы аттенюатора определяются следующим образом

$$R_1 \approx \frac{R_0 \cdot (D-1)}{D+1}, R_2 \approx \frac{2 \cdot D \cdot R_0}{D^2 - 1}.$$

Практическая схема ступенчатого регулятора на 18 дБ для 75-омного тракта передачи приведена на рис. 5.3.

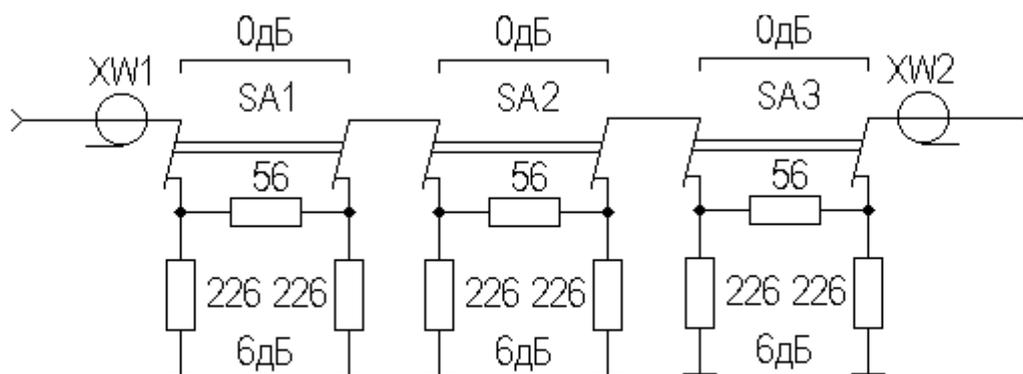


Рис. 5.3. Ступенчатый регулятор

Схема построена на основе одинаковых П-образных звеньев с затуханием в шесть децибел. В зависимости от положения переключателей  $SA_1 \div SA_3$  данный регулятор обеспечивает затухание от 0 до 18 дБ с шагом 6 дБ.

Подобный регулятор обычно располагают между источником сигнала и входом усилителя. В связи с тем, что входное и выходное сопротивления данного регулятора не зависят от уровня вносимого затухания, величина частотных и временных искажений, создаваемых входной цепью, также остается постоянной при разных уровнях затухания.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Пояснительная записка к курсовому проекту содержит следующие разделы.

- титульный лист;
- аннотация;
- техническое задание;
- содержание (оглавление);
- введение (анализ задания);
- электрический расчет элементов схемы;
- результаты симуляции и их анализ;
- заключение;
- список использованной литературы.

В число обязательных чертежей курсового проекта входят:

- схемы электрические принципиальные;
- результирующие характеристики.

Пояснительная записка оформляется на листах размера А4 в соответствии с общими требованиями к текстовым документам. Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого материала.

Обязательными иллюстрациями также являются:

- электрические схемы отдельных рассчитываемых каскадов;
- входные, проходные и выходные характеристики транзисторов с необходимыми построениями на этих характеристиках;
- измеренные параметры транзисторов;
- схемы и диаграммы Боде.

Обозначения элементов в тексте пояснительной записки и на электрических схемах должны соответствовать друг другу. Допускается использовать отдельную нумерацию элементов при рассмотрении каждого каскада или единую нумерацию, принятую на полной принципиальной электрической схеме устройства.

Разделы пояснительной записки, имеющие заголовки, должны быть пронумерованы. Нумерация всех рисунков, а также тех таблиц и формул, на которые делаются ссылки в тексте, обязательна. Она является сквозной для всей пояснительной записки.

## 7. ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Защита проекта является заключительным этапом курсового проектирования.

Пояснительная записка должна быть сдана на проверку руководителю проектирования не позднее чем за одни сутки до защиты. Руководитель делает в тексте пояснительной записки свои замечания по проекту и допускает проект к защите, делая об этом надпись на титульном листе.

При проверке преподаватель оценивает проект по следующим показателям:

Группа	Ф.И.О. студента		
Показатели	Да	Частично	Нет
Соответствие проекта техническому заданию			
Наличие обоснования принятых решений			
Наличие расчета основных показателей			
Наличие результатов симуляции			
Аккуратность составления пояснительной записки и грамотность			
Соответствие пояснительной записки требованиям ЕСКД			

Если студент закончил проектирование и сдал на проверку пояснительную записку не позднее 10-й недели семестра, допускается выставление оценки за курсовой проект руководителем проектирования без публичной защиты.

Защита проводится публично перед комиссией. Состав комиссии устанавливается распоряжением заведующего кафедрой. В комиссию включаются преподаватель, который координирует на кафедре проектирование по данной дисциплине (председатель комиссии), и руководитель проекта, а также другие преподаватели по профилю проектирования. Минимальный состав комиссии составляет два человека.

Студент, защищающий курсовой проект, должен представить презентацию и сделать сообщение о проделанной работе продолжительностью примерно 5 минут. В сообщении излагаются основные требования и пути реализации задания, описываются технические решения, примененные студентом при разработке устройства.

При изложении материала студент должен продемонстрировать:

- умение кратко, четко и технически грамотно излагать содержание проекта;
- умение обосновать с инженерной точки зрения выбранный вариант устройства;
- владение теоретическим материалом по предмету курсового проекта.

После сообщения студент отвечает на вопросы членов комиссии.

По результатам защиты студенту выставляется оценка. Оценка за курсовой проект отражает качество выполнения проекта и качество защиты.

На оценку влияют:

- обоснованность принятых решений;
- правильность расчетов и качество оформления пояснительной записки (оценка выставляется преподавателем, проверяющим пояснительную записку, и при необходимости сопровождается рецензией);
- качество доклада;
- правильность и полнота ответов на вопросы.

До начала экзаменационной сессии студент может с согласия председателя комиссии повторно защитить проект на более высокую оценку в комиссии того же состава, что и при первой защите (это же относится к случаю, когда студент получил неудовлетворительную оценку). При повторной защите обязательно присутствие руководителя проекта.

Если студент трижды получает неудовлетворительную оценку, он должен выполнить новый проект по новому заданию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коноплев Б.Г. Сборник лабораторных работ, выполняемых с помощью программы Electronics Workbench / Б.Г. Коноплев, Е.Б. Лукьяненко, А.В. Фомичев. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2003. – 37 с.
2. Шарыгина Л.И. Схемотехника аналоговых электронных устройств : лабораторная тетрадь студента / Л.И. Шарыгина. – Томск : Изд-во ТУСУР, 2007. – 70 с.
3. Шарыгина Л.И. Лекции по аналоговым электронным устройствам , Л.И. Шарыгина. – Томск : Изд-во ТУСУР, 2017. – 207 с.
4. ОС ТУСУР 01–2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления // ТУСУР. – Томск, 2013. – URL: [https://regulations.tusur.ru/storage/150499/ОС\\_ТУСУР\\_01-2021\\_\(согласовано\).pdf?1642386839](https://regulations.tusur.ru/storage/150499/ОС_ТУСУР_01-2021_(согласовано).pdf?1642386839) (дата обращения: 01.12.2024).

**Приложение А**  
(обязательное)

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО  
ТРАНЗИСТОРА В СРЕДЕ WORKBENCH**

**А1. Измерение низкочастотных параметров транзистора**

***А1. Измерение входной и проходной характеристик транзистора***

Снимите входную  $I_{\text{б}} = f(U_{\text{б}})$  и проходную  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{б}})$  статические характеристики выбранного биполярного транзистора. Для этого целесообразно использовать отдельные источники питания для коллектора и базы (еще удобнее для питания базовой цепи пользоваться источником тока (рис. А1)).

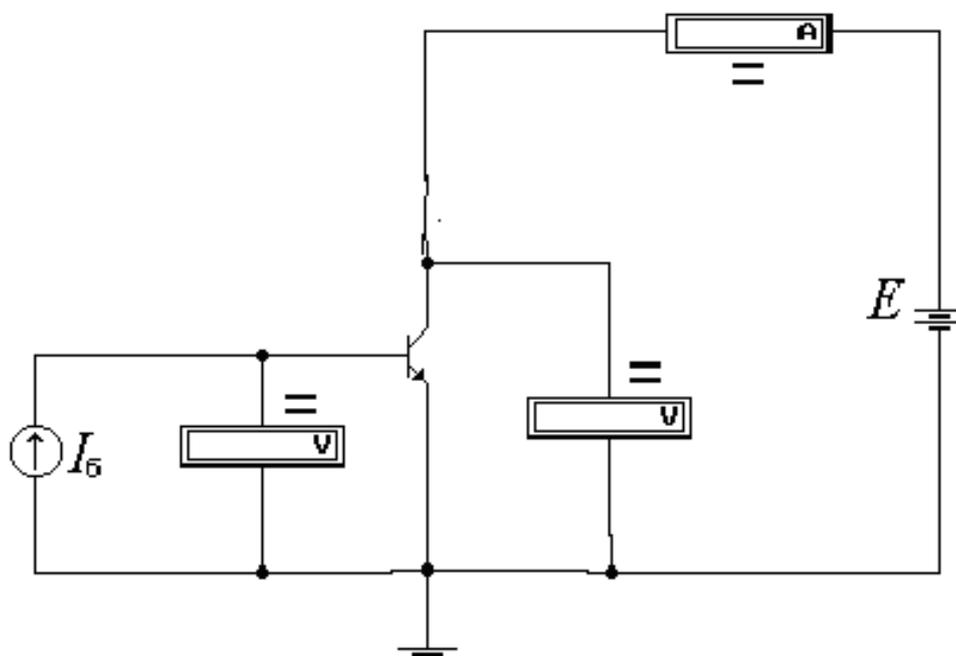


Рис. А1. Схема снятия статических характеристик

Характеристики снимите при фиксированном напряжении на коллекторе (допустим,  $U_{\text{к}} = 5 \text{ В}$ ). Целесообразные значения тока коллектора ориентировочно выберите с учетом задания на проектирование (см. выше). С учетом этого выбираются значения задающего тока источника в цепи базы.

Результаты измерений занесите в табл. А1.

Таблица А1 – Статические характеристики транзистора

Условия измерения:  $U_{\text{к}} = 5 \text{ В}$

$I_{\text{б}}$ , мкА									
$I_{\text{к}}$ , мА									
$U_{\text{б}}$ , В (мВ)									

Постройте входную  $I_{\text{б}} = f(U_{\text{б}})$  и проходную  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{б}})$  статические характеристики для дальнейшего использования.

## ***A2. Измерение зависимости входного сопротивления и крутизны транзистора от режима его работы***

Полученные измерения могут быть использованы для определения зависимости крутизны и входного сопротивления от режима работы транзистора  $S = f(I_{К=})$ ,  $R_{вх} = f(U_{б=})$ .

Но возможен и другой способ (более удобный и, возможно, несколько более точный). В схеме (рис. А1) параллельно генератору тока добавьте источник переменного напряжения и измеряйте переменные токи в цепи базы и коллектора (рис. А2).

Результаты измерений занесите в табл. А2.

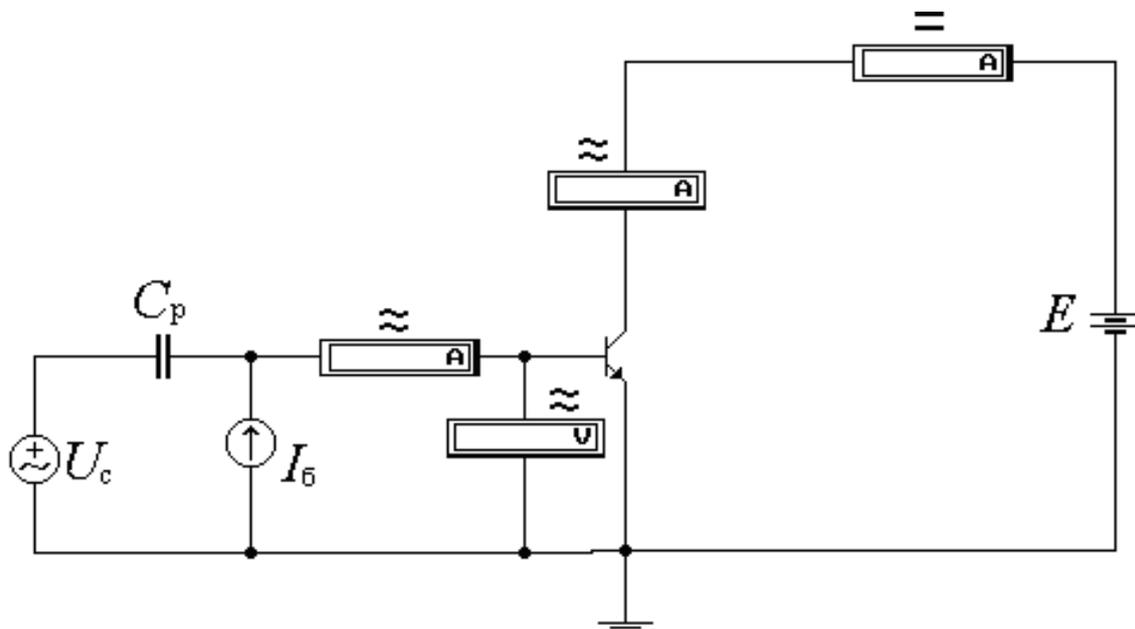


Рис. А2. Схема измерений для вычисления крутизны и входного сопротивления

Таблица А2 – Параметры транзистора на переменном токе

Условия измерения:  $U_{К=} = 5 \text{ В}$

$I_{б=}$ , мкА									
$I_{к=}$ , мА									
$U_{б=}$ , В (мВ)									
$U_{б\approx}$ , В (мВ)									
$I_{б\approx}$ , мкА									
$I_{к\approx}$ , мА									
$S = I_{к\approx} / U_{б\approx}$ , мА/В									
$R_{вх} = U_{б\approx} / I_{б\approx}$ , Ом									

Постройте графики зависимостей  $S = f(I_{К=})$ ,  $R_{вх} = f(U_{б=})$

## ***A3. Измерение выходных характеристик транзистора***

Выходные статические характеристики также можно снимать двумя способами. В первом случае с помощью схемы рис. А1 измеряется постоянная составляющая тока коллектора при заданном фиксированном значении тока базы (изменяется напряжение на коллекторе) (табл. А3).

Таблица А3 – Выходные характеристики транзистора

Условия измерения: $I_{б=}$ , мкА									
$U_{к=}$ , В									
$I_{к=}$ , мА									

Повторите измерения для нескольких значений тока базы и постройте выходные характеристики исследуемого транзистора  $I_{к} = f(U_{к})$ .

Второй вариант – схема на рис. А3.

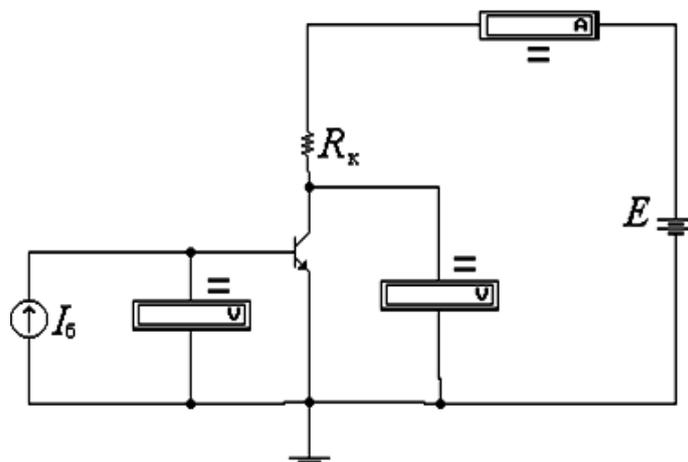


Рис. А3. Схема измерения выходных характеристик транзистора

Результаты измерений занесите в табл. А4.

Таблица А4 – Выходные характеристики транзистора

Условия измерения: $I_{б=}$ , мкА; $E$ , В									
$R_{к}$ , кОм									
$U_{к=}$ , В									
$I_{к=}$ , мА									

Напряжение питания выберите 25–30 В, чтобы иметь возможность менять напряжение на коллекторе в более широких пределах (иллюстрацию см. на рис. А4).

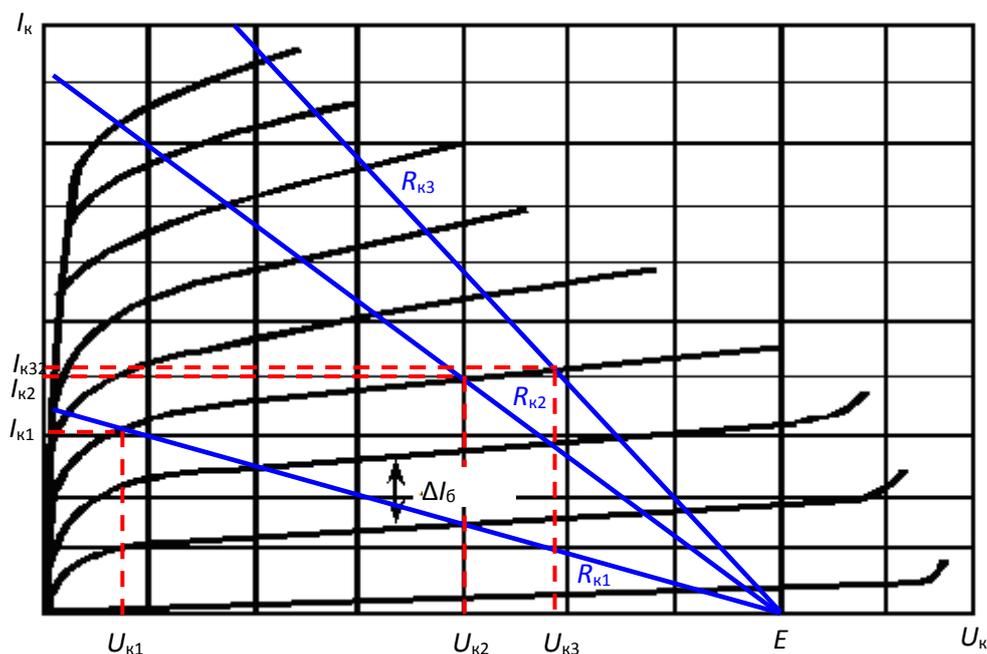


Рис. А4. Измерение выходных характеристик транзистора

**Приложение Б**  
(обязательное)

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА**

Для описания поведения транзистора на верхних частотах в дополнение к указанному в паспорте транзистора параметру ( $r_6$ ) необходимо получить зависимости емкости коллекторного перехода от напряжения на переходе база–коллектор  $C_{бк} = f(U_{кб})$  и постоянной времени от тока покоя коллектора  $\tau = f(I_{к=})$ .

Методика измерения емкости коллекторного перехода описана в пособии [1], прямая выдержка из которого приводится ниже.

**Измерение емкости обратно-смещенного  
коллекторно-базового перехода  $C_k$**

Измерительная схема приведены на рис. Б1.

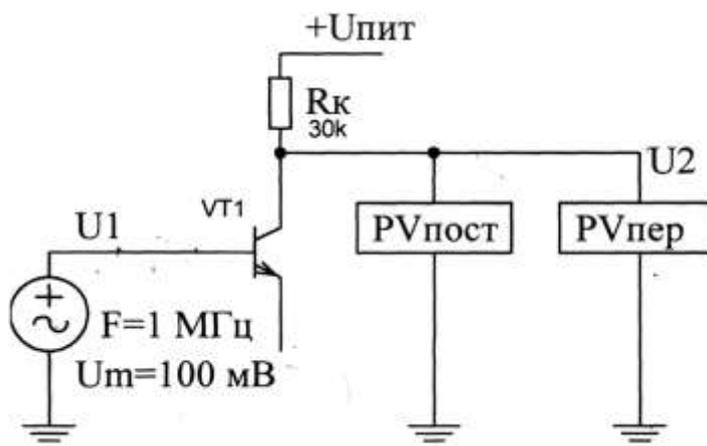


Рис. Б1

Емкость обратно-смещенного коллекторно-базового перехода  $C_k$  образует с сопротивлением резистора  $R_k$  делитель напряжения. Измерив значение переменных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , можно рассчитать емкость  $C_k$  по формуле

$$C_k = \frac{U_1}{2\pi F R_k (U_1 - U_2)},$$

где  $F$  – частота источника синусоидального напряжения.

Для повышения точности определения емкости  $C_k$  сопротивление  $R_k$  подбирается таким, чтобы  $U_2 \approx 0,5U_1$ . Измерения производятся при различных значениях постоянного напряжения коллектор–база путем изменения напряжения от 1 до 10 В. Строится зависимость  $C_k = f(U_{кб})$ . Аналогично может быть измерена емкость обратно-смещенного эмиттерно-базового перехода.

Возможен другой способ измерения емкости коллекторного перехода с одновременным определением постоянной времени транзистора, описанный в [2]. Выдержка с некоторыми изменениями также приводится ниже.

Искажения, создаваемые входной цепью каскада, описываются постоянной времени верхних частот входной цепи:

$$\tau_{вх} = C_{вхдин} \cdot \frac{R_{ген} \cdot R_{вх}}{R_{ген} + R_{вх}}, \quad (1)$$

$R_{ген}$  – выходное сопротивление источника сигнала,

$R_{вх}$  – входное сопротивление каскада,

$C_{вх\_дин}$  – входная динамическая емкость каскада, определяемая суммой

$$C_{вх\_дин} \approx \frac{\tau}{r_{\bar{6}}} + C_{\bar{6}к} \cdot (1 + K_0), \quad (2)$$

$K_0$  – коэффициент усиления каскада,

$\tau$  – постоянная времени транзистора,

$r_{\bar{6}}$  – объемное сопротивление базы,

$C_{\bar{6}к}$  – емкость перехода база–коллектор.

Искажения, создаваемые выходной цепью каскада, определяются постоянной времени верхних частот выходной цепи:

$$\tau_{вых} = \tau + C_{\bar{6}к} \cdot (1 + S_0 r_{\bar{6}}) \cdot R_{\bar{6}кв} + C_{н} \cdot R_{\bar{6}кв}, \quad (3)$$

где  $S_0$  – крутизна транзистора в рабочей точке,

$R_{\bar{6}кв}$  – эквивалентное сопротивление нагрузки каскада, состоящее из параллельно включенных выходного сопротивления транзистора  $R_i$ , сопротивления коллектора  $R_k$  и сопротивления нагрузки  $R_n$ :

$$R_{\bar{6}кв} = R_i \parallel R_k \parallel R_n \approx \frac{R_k \cdot R_n}{R_k + R_n}. \quad (4)$$

Выберите рабочую точку транзистора, высокочастотные параметры которого подлежат измерению. При выборе рабочей точки целесообразно пользоваться характеристиками транзистора, измеренными при выполнении действий, описанных с Приложении А. Желательно, чтобы рабочая точка находилась на линейном участке входной (проходной) характеристики транзистора.

Для определения  $C_{\bar{6}к}$  и  $\tau$  можно использовать соотношение (1). Для этого необходимо предварительно определить входное сопротивление и крутизну транзистора в рабочей точке. Для измерений может быть использована схема, изображенная на рис. Б1 (здесь и далее для примера взят транзистор 2N2923).

При измерении  $R_{вх}$  и  $S_0$  частота генератора выбирается примерно равной 1–5 кГц, чтобы исключить влияние изменения этих параметров по мере увеличения частоты. Как видно из рис. Б2, емкость разделительного конденсатора на входе выбрана равной 1 мкФ, также чтобы исключить влияние искажений, теперь уже на нижних частотах.

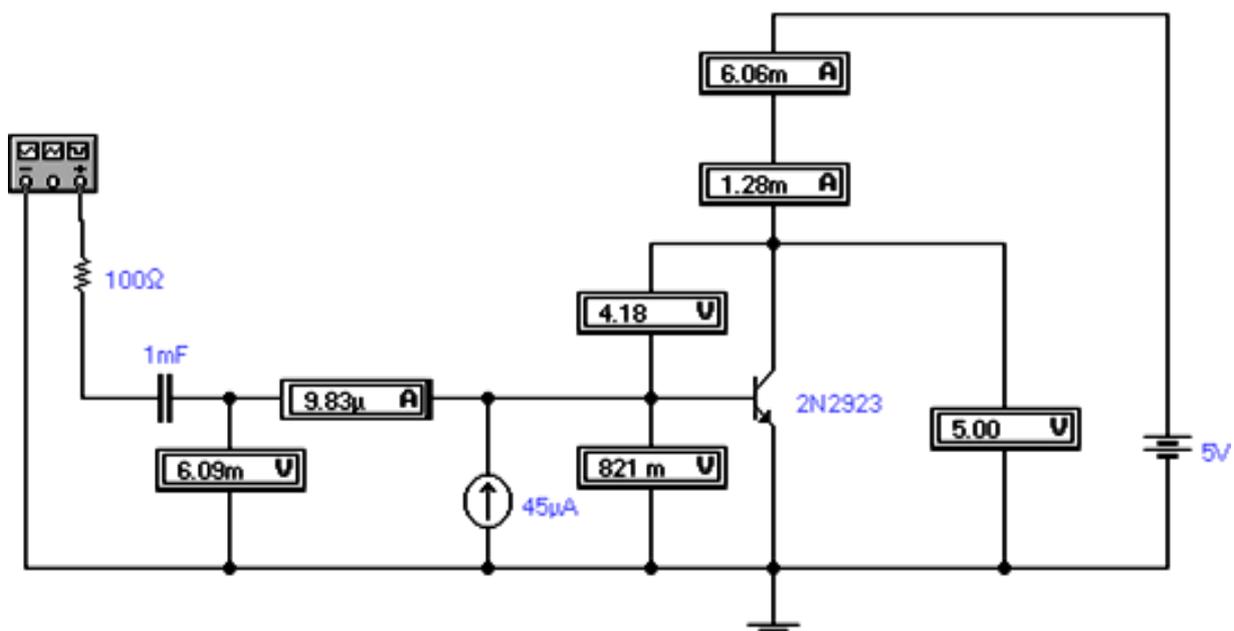


Рис. Б2. Схема измерения параметров транзистора 2N2923 на переменном токе

В результате измерений для схемы рис. Б2  $I_{\text{бэ}} = 9,83 \text{ мкА}$ ,  $I_{\text{кэ}} = 1,28 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{бэ}} = 6,09 \text{ мВ}$ . При этом  $R_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}} / I_{\text{бэ}} = 6,09 \cdot 10^{-3} / (9,83 \cdot 10^{-6}) = 620 \text{ Ом}$ ,  $S_0 = I_{\text{кэ}} / U_{\text{бэ}} = 1,28 \cdot 10^{-3} / (6,09 \cdot 10^{-3}) = 210 \text{ мА/В}$ .

При выполнении этого эксперимента для контроля можно определить  $R_{\text{вх}}$  другим способом: вольтметр, измеряющий переменное напряжение, подключается непосредственно к выходным зажимам генератора переменного тока для измерения ЭДС источника сигнала  $e$ . Коэффициент передачи входной цепи определяется как

$$K_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{ген}} + R_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{бэ}}}{e}.$$

Можно просто воспользоваться результатами измерений, выполненных согласно Приложению А.

Для определения  $\tau_{\text{ввх}}$  следует измерить верхнюю граничную частоту  $f_{\text{ввх}}$  частотной характеристики входной цепи на уровне 0,7 (-3 дБ). В нашем примере  $f_{\text{ввх}} = 15,1 \text{ МГц}$ .

При этом  $\tau_{\text{ввх}} = 1 / 2\pi f_{\text{ввх}}$  и  $C_{\text{вх,дин}} = \frac{\tau}{r_{\text{б}}}$  +  $C_{\text{бк}}$ , поскольку в схеме на рис. Б2 отсутствует сопротивление в цепи коллектора и, следовательно, коэффициент усиления равен нулю.

Поскольку в формуле (2) две неизвестных величины, следует найти еще одно значение  $C_{\text{вх,дин}}$ , добавив сопротивление в цепь коллектора и изменив напряжение источника питания таким образом, чтобы рабочая точка транзистора осталась прежней:

$$E = U_{\text{к0}} + R_{\text{к}} \cdot I_{\text{к0}}.$$

В нашем примере  $E = 5 \cdot 10^3 \cdot 6,06 \cdot 10^{-3} = 11 \text{ В}$  (рис. Б3),  $K_0 = U_{\text{кэ}} / U_{\text{бэ}} = 1,2 / (6,09 \cdot 10^{-3}) = 197$ ,  $f_{\text{ввх}} = 1,44 \text{ МГц}$ .

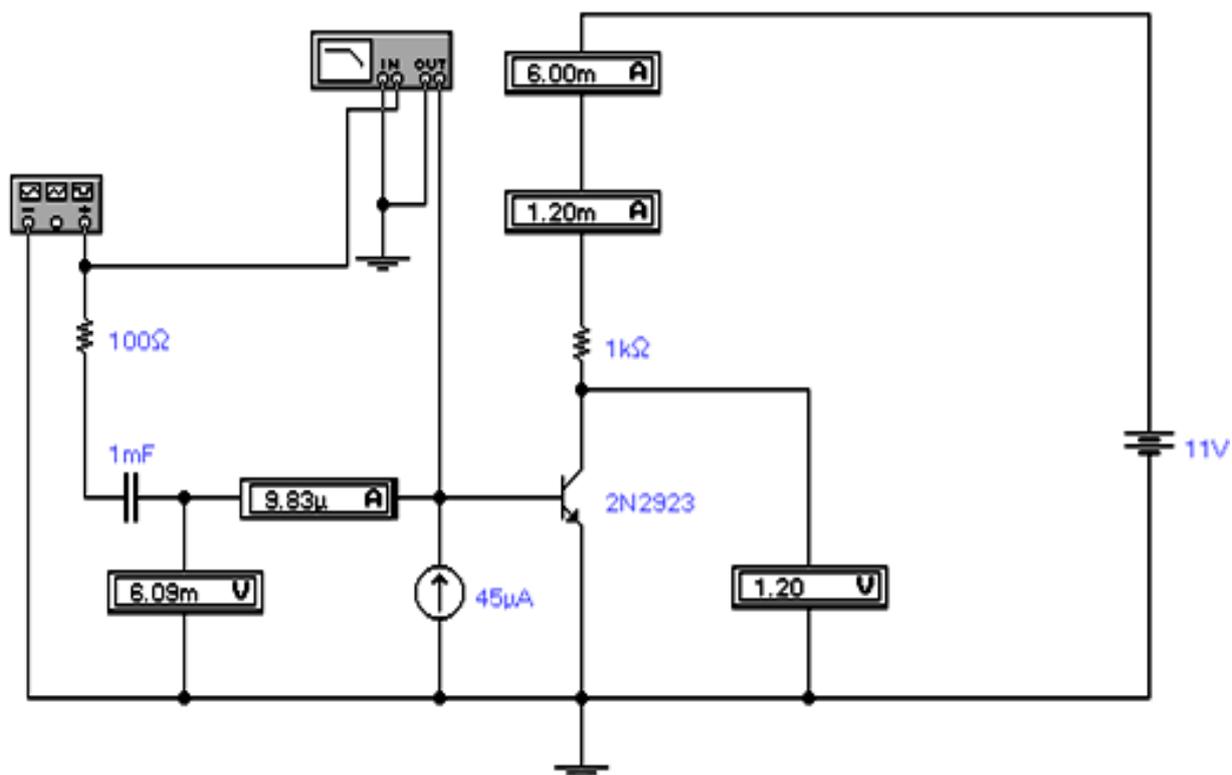


Рис. Б3. Схема измерения для случая  $R_{\text{к}} \neq 0$

Искомые величины определяются решением системы уравнений:

$$C_{\text{вх\_дин}} = \frac{\tau}{r_{\text{б}}} + C_{\text{бк}}, \quad \tau_{\text{ввх}} / R_{\text{экв}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{ввх}}} \cdot \frac{R_{\text{ген}} + R_{\text{вх}}}{R_{\text{ген}} \cdot R_{\text{вх}}},$$

$$C_{\text{вх\_дин}} = \frac{\tau}{r_{\text{б}}} + C_{\text{бк}}(1 + K_0), \quad \tau_{\text{ввх}} / R_{\text{экв}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{ввх1}}} \cdot \frac{R_{\text{ген}} + R_{\text{вх}}}{R_{\text{ген}} \cdot R_{\text{вх}}}.$$

В рассматриваемом примере  $C_{\text{бк}} = 5,8$  пФ,  $\tau = 0,19$  нс ( $r_{\text{б}} = 1,63$  Ом – из списка параметров транзистора).

Можно несколько упростить процесс измерений: первым сделать измерение при наличии  $R_{\text{к}}$  (как на рис. Б3), второе измерение для реализации нулевого коэффициента усиления (сопротивление нагрузки переменному току равно нулю) выполняется при закорачивании коллектора по переменному току через разделительный конденсатор (рис. Б4).

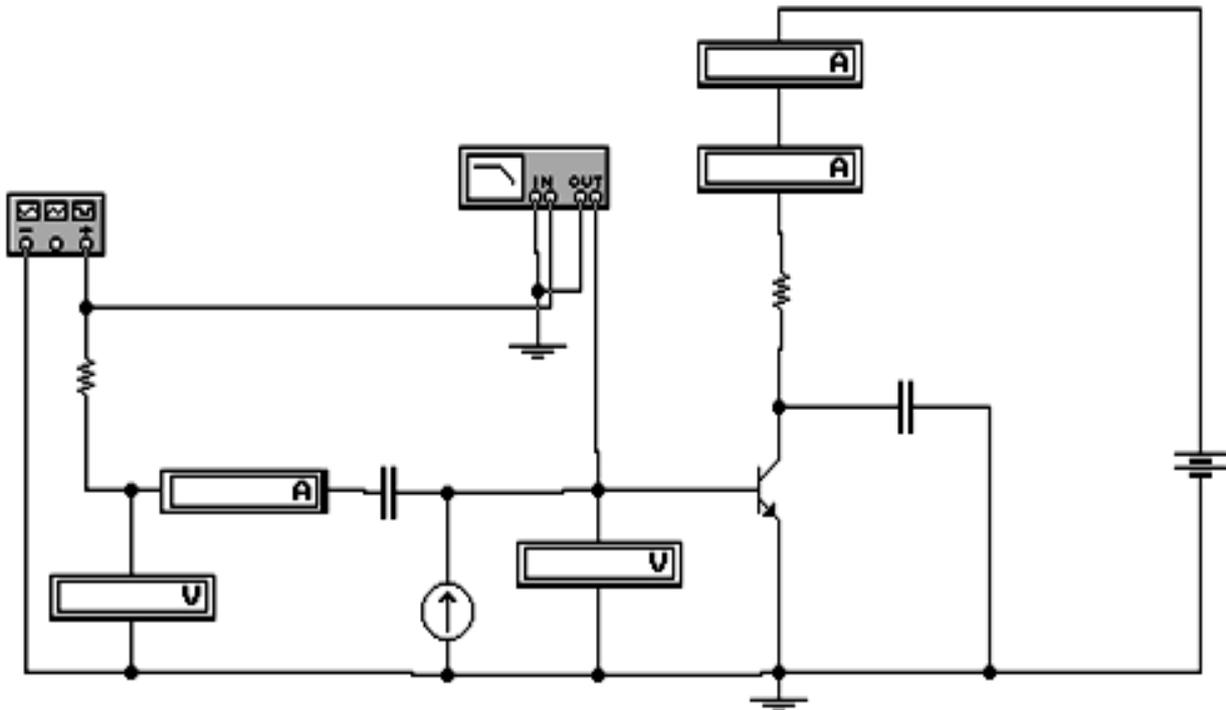


Рис. Б4. Схема измерения для случая  $R_{\text{н}} = 0$

Результаты определения высокочастотных параметров целесообразно проверить, используя их для расчета постоянной времени выходной цепи  $\tau_{\text{ввых}}$  по формуле (3) с последующим измерением верхней граничной частоты выходной цепи и вычислением по ней  $\tau_{\text{ввых}}$  для сравнения с ранее вычисленным значением.

При выполнении этого эксперимента необходимо исключить влияние входной цепи на полосу пропускания. Для этого следует либо сделать  $R_{\text{ген}}$  равным нулю (рис. Б5), либо подключить входной сигнал от плоттера непосредственно к базе (рис. Б6).

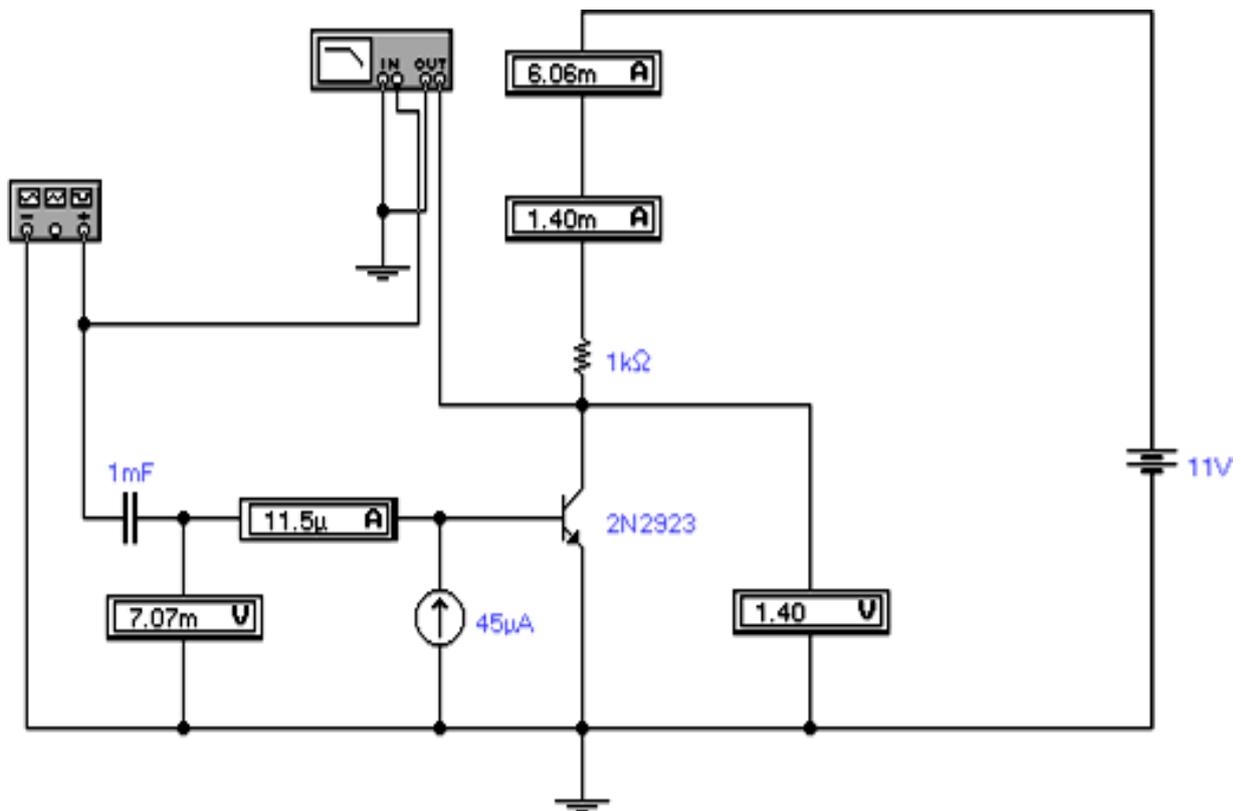


Рис. Б5. Измерение частотных свойств выходной цепи с  $R_{ген} = 0$

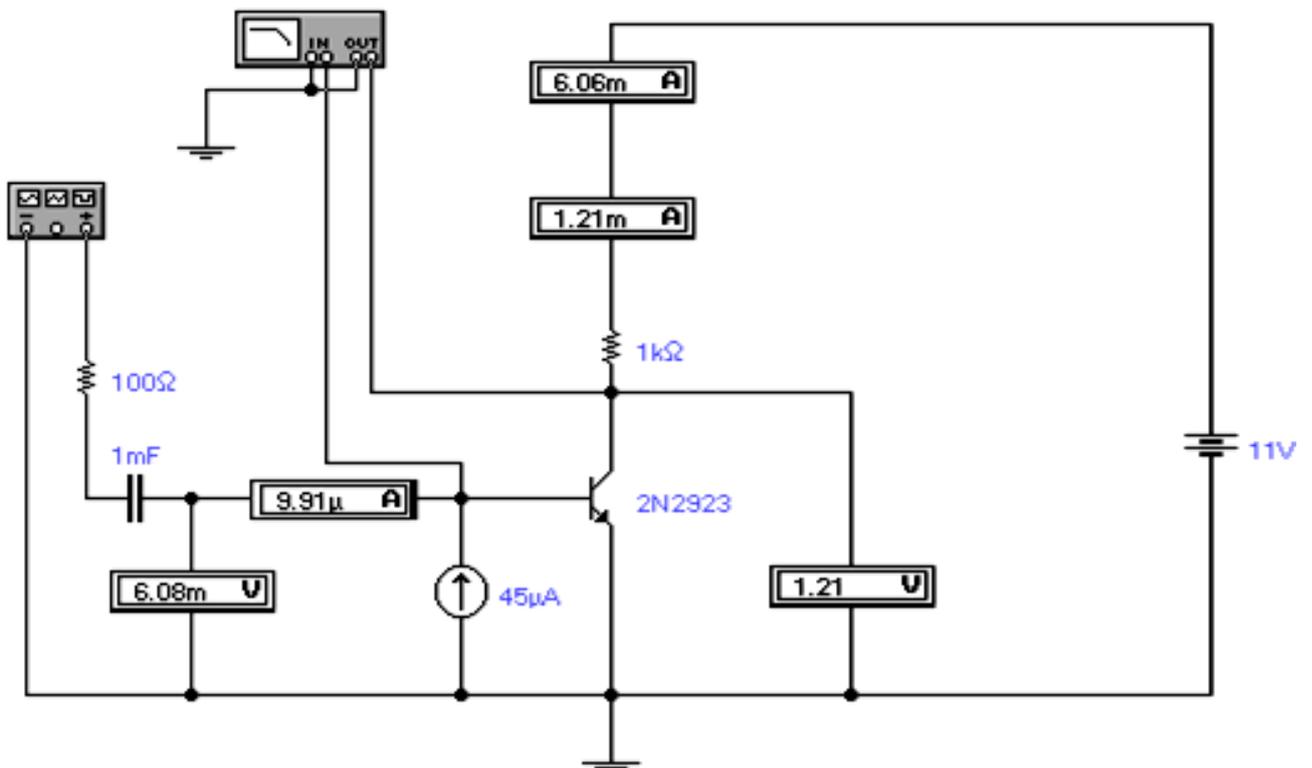


Рис. Б6. Измерение частотных свойств выходной цепи

Вычисленное в нашем примере  $\tau_{ввых}$  равно 7,9 нс ( $f_{ввых} = 20$  МГц), измеренная  $f_{ввых} = 23,2$  МГц – погрешность составляет 16%.

Увеличьте напряжение питания, с тем чтобы постоянное напряжение между коллектором и базой увеличилось примерно вдвое ( $I_{к0}$  сохраните примерно тем же, что и ранее). Вновь определите  $C_{бк}$  и  $\tau$  описанным выше способом и оцените влияние изменения напряжения между коллектором и базой (эксперимент можно выполнить два-три раза).

Повторите измерения для нескольких значений напряжения на  $C_{бк}$  и постройте график зависимости  $C_{бк} = f(U)$ .

Верните напряжение питания к первоначальному значению. Увеличьте  $I_{к0}$  примерно вдвое и оцените влияние изменения тока на  $C_{бк}$  и  $\tau$ .

Повторите измерения для нескольких значений тока покоя и постройте график зависимости  $\tau = f(I_{к0})$ .

**Приложение В**  
(обязательное)

**СПИСОК ФОРМУЛ,  
КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ПОЛЕЗНЫМИ ПРИ РАСЧЕТАХ**

$$E = U_{к0} + R_{к} I_{к0} \quad , \quad R_{б} = \frac{E - U_{б0}}{I_{б0}} \quad ,$$

$E$  – напряжение источника питания,  $U_{к0}$  – напряжение эмиттер–коллектор в рабочей точке,  $R_{к}$  – сопротивление в цепи коллектора,  $I_{к0}$  – ток коллектора в рабочей точке,  $U_{б0}$  – напряжение база–эмиттер в рабочей точке,  $I_{б0}$  – ток базы в рабочей точке,  $R_{б}$  – сопротивление в цепи базы.

$\tau_{в} = \tau + C_{бк} (1 + S_0 r_б) R_{экв} + (C_{н} + C_{м}) R_{экв}$  – постоянная времени выходной цепи,

$\tau_{в\text{вх}} = C_{вх\text{дин}} \cdot \frac{R_{ген} \cdot R_{вх}}{R_{ген} + R_{вх}}$  – постоянная времени входной цепи,

$\tau = \frac{S_0 r_б}{2\pi f_T}$  – постоянная времени транзистора,

$C_{вх\text{дин}} = \frac{\tau}{r_б} + C_{бк} (1 + K_0)$  – входная динамическая емкость транзистора,

$S_0$  – крутизна транзистора в рабочей точке,  $r_б$  – объемное сопротивление базы,  $C_{бк}$  – емкость перехода база–коллектор,  $R_{экв}$  – параллельное соединение сопротивления в цепи коллектора и сопротивления нагрузки,  $C_{н}$ , и  $C_{м}$  – емкость нагрузки и емкость монтажа,  $\tau_{в\text{вх}}$  – постоянная времени входной цепи,  $R_{вх}$  – входное сопротивление транзистора,  $R_{ген}$  – сопротивление источника сигнала,  $K_0$  – коэффициент усиления каскада.

**Приложение Г**  
(обязательное)

**ПЛАН РАБОТЫ ПО ПЕРВОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА**

**Широкополосный усилитель**

1. Выберите рабочую точку транзистора с тем, чтобы на нагрузке  $R_{Ом}$  обеспечить напряжение  $X_B$ . Как вариант, *сопротивление в цепи коллектора сделайте равным сопротивлению нагрузки.*

Если в задании указана верхняя граничная частота всего усилителя или выходного каскада  $R_k$  и рабочая точка выходного каскада выбираются с учетом этих требований.

2. Определите расчетом напряжение питания и сопротивление в цепи базы, необходимые для обеспечения рабочей точки в схеме питания фиксированным током базы.

3. Соберите схему рассчитанного каскада и убедитесь, что рабочая точка обеспечена.

4. Расчетным путем и моделированием убедитесь, что заданное выходное напряжение обеспечено.

5. Измерьте параметры транзистора в рабочей точке (методика измерения параметров изложена в Приложении 1).

6. Рассчитайте верхнюю граничную частоту выходной цепи при емкости нагрузки  $C_{пФ}$ . Сравните рассчитанное значение с измеренным при моделировании.

7. Рассчитайте верхнюю граничную частоту входной цепи, приняв сопротивление источника сигнала равным сопротивлению в цепи коллектора исследуемого каскада. Сравните рассчитанное значение с измеренным при моделировании.

8. Подключите ко входу исследуемого каскада аналогичный каскад с таким же сопротивлением в цепи коллектора, но в два раза меньшим током покоя.

Продумайте схему питания подключаемого каскада и обеспечьте ее.

Проверьте на модели, изменилась ли верхняя граничная частота входной цепи оконечного каскада.

9. Рассчитайте граничную частоту входной цепи входного каскада, приняв сопротивление источника сигнала равным  $R_{ген. Ом}$ . Сравните рассчитанное значение с измеренным при моделировании.

10. Рассчитайте и измерьте коэффициент усиления рассчитанного усилителя. Рассчитайте, какой должна быть ЭДС источника сигнала, чтобы получить заданное выходное напряжение?

11. Рассчитайте и измерьте полосу пропускания рассчитанного усилителя.

На первом этапе проектирования при сохранении принципиальной структуры возможны варианты – комбинация из двух реостатных каскадов может быть заменена комбинацией каскад плюс повторитель или каскад плюс фазоинверсный каскад и т.д.

## Усилитель постоянного тока прямого усиления (расчет карты напряжений)

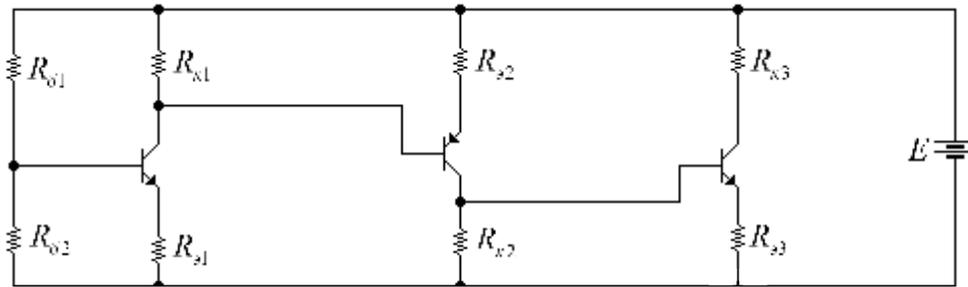


Рис. Г1. Принципиальная схема трехкаскадного усилителя постоянного тока прямого усиления

1. Проектирование начинается с расчета выходного каскада.

Рабочая точка транзистора выбирается с тем, чтобы на нагрузке  $R_{н}$  обеспечить напряжение  $X_{в}$ . Как вариант, *сопротивление в цепи коллектора может быть равным сопротивлению нагрузки.*

2. Напряжение питания выбирается так, чтобы при выбранном  $R_{к}$  обеспечить нулевой потенциал выхода по отношению к общему проводу.

*Расчет удобнее вести для однополярного питания с последующим переходом в двухполярному. При этом предполагается, что потенциал выхода и входа по отношению к общему проводу  $E/2$*

3. После выбора напряжения на коллекторе определяется напряжение на эмиттере  $U_{э} = E - U_{к}$ , где  $E$  напряжение двухполярного источника питания  $\pm E$ .  $U_{бэ} = U_{э} + U_{бэ}$  используется в дальнейшем для расчета промежуточного каскада (после расчета входного).

4. Поскольку потенциал входа по отношению к общему проводу должен быть равен нулю (в данном расчете  $E$  по отношению к общему проводу), напряжение на  $R_{э1} = E - U_{бэ1}$ . Потенциал коллектора определяется этим напряжением плюс  $U_{кэ1}$

5. Результаты расчетов ( $U_{кэ1}$  и  $U_{бэ}$ ) используются для выбора режима промежуточного каскада. Допускаются некоторые изменения предыдущих расчетов небольшие изменения напряжений на коллекторах).

Результаты расчетов позволяют составить карту напряжений, проверяя ее последующей симуляцией.