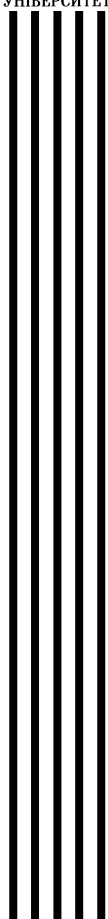


Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по самостоятельному изучению дисциплины
«АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА»
и выполнению контрольной работы
для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника»
заочной формы обучения

Севастополь
2013



УДК 621.375

Методические указания по самостоятельному изучению дисциплины «Аналоговые электронные устройства» и выполнению контрольной работы для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника» заочной формы обучения / Сост. А.В. Мельников. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013 — 92 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при самостоятельном изучении дисциплины «Аналоговые электронные устройства» и выполнении контрольной работы, предусмотренной учебным планом направления подготовки «Радиотехника».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций, протокол № 5 от 23 января 2013 г.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент Зиборов С.Р.

Ответственный за выпуск:

Заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций,
доктор технических наук, профессор Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель изучения дисциплины	4
2. Методические указания по изучению дисциплины и первое контрольное задание	5
2.1. Основные определения. Показатели и характеристики усилительных устройств	6
2.2. Обратная связь в усилительных устройствах	18
2.3. Обеспечение режима работы усилительных элементов по постоянному току	23
2.4. Каскады предварительного усиления.	28
2.5. Дифференциальный усилительный каскад	37
2.6. Мощные усилительные каскады	45
2.7. Усилители постоянного тока	51
2.8. Операционные усилители	53
2.9. Устройства аналоговой обработки сигналов на операционных усилителях	57
2.10. Первое контрольное задание	62
3. Методические указания к решению задач и второе контрольное задание	64
3.1. Методические указания к решению задач	64
3.2. Задачи по дисциплине «Аналоговые электронные устройства»	66
Библиографический список	87
Приложение А. Выходные характеристики транзисторов, встречающихся в контрольном задании	88

1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель изучения дисциплины «Аналоговые электронные устройства» — привить студентам знания и навыки, позволяющие технически грамотно осуществлять анализ и синтез электрических схем аналоговых трактов типовой радиоэлектронной аппаратуры, обоснованный выбор структуры и компонентов схем.

Дисциплина «Аналоговые электронные устройства» является первой инженерной дисциплиной и расположена в учебном плане специальности «Радиотехника» на стыке дисциплин, обеспечивающих базовую теоретическую и инженерную подготовку радиоинженеров. Изложение материала базируется на ранее изученных теоретических курсах: высшая математика, физика, основы теории цепей, компонентная база РЭА, сигналы и процессы в радиотехнике, вычислительная техника и программирование. Поэтому студент должен иметь прочные знания по этим предметам.

В результате изучения дисциплины студент должен знать принципы действия усилительных каскадов и устройств, в том числе дифференциальных каскадов, операционных усилителей, а также устройств аналоговой обработки сигналов, построенных на базе усилителей; современные методы анализа и схемотехнического проектирования этих каскадов и устройств с применением электронно-вычислительной техники и с учетом применения современной элементной базы. Студент должен уметь проводить анализ практических схем усилительных устройств, рассчитывать их основные характеристики, составлять схемы усилителей с учетом особенностей их применения.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ И ПЕРВОЕ КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Перед изучением дисциплины следует уяснить её объем, характер и структуру с помощью настоящих методических указаний. Изучать дисциплину необходимо систематически в течение семестра, составляя при этом краткий конспект. Последовательность изучения дисциплины определяется рабочей программой. Изучение дисциплины в сжатые сроки перед экзаменом не дает прочных знаний.

Самостоятельная работа по изучению дисциплины должна подвергаться систематическому самоконтролю. С этой целью следует, по мере проработки очередной главы курса отвечать на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях. Проработка контрольных вопросов способствует более глубокому усвоению материала. После изучения очередной главы необходимо решить соответствующие типовые задачи и затем приступить к выполнению контрольного задания.

Рекомендации по использованию основной и дополнительной литературы приведены в соответствующих разделах методических указаний. Однако важно пользоваться и другой литературой, рекомендуемой в качестве учебников и учебных пособий для ВУЗов. Следует также постоянно обращаться к периодическим отечественным и зарубежным изданиям, в которых оперативно освещаются актуальные вопросы теории и техники усилительных устройств, а также устройств аналоговой обработки сигналов.

Приступить к выполнению контрольной работы нужно после изучения теоретического материала. Контрольная работа состоит из двух контрольных заданий. Варианты заданий выбираются в соответствии с двумя последними цифрами зачетной книжки. Первое контрольное задание заключается в ответе на теоретические вопросы. Варианты заданий приведены в таблице 2.1. Второе контрольное задание заключается в решении задач. Вариант второго задания определяется из таблицы 3.1.

Если работа не зачтена, следует внимательно ознакомиться с рецензией и, при необходимости, получить устную либо письменную консультацию в установленном порядке.

2.1. Основные определения и показатели усилительных устройств

Усилителем электрических колебаний называют устройство, которое за счет энергии источника питания формирует на выходе колебание, являющееся по форме копией входного сигнала, но с большим уровнем мощности.

Аналоговые электронные устройства — это устройства усиления и обработки аналоговых электрических сигналов, выполненные на основе электронных приборов.

В настоящее время наиболее распространены следующие способы классификации усилительных устройств:

- по форме усиливаемых сигналов (усилители непрерывных и усилители импульсных сигналов);
- по рабочему диапазону частот (усилители постоянного тока, усилители звуковой частоты, усилители радиочастоты, широкополосные усилители, избирательные усилители, СВЧ усилители);
- по типу усилительного элемента (транзисторные, ламповые, на интегральных микросхемах, на туннельных диодах и др.);
- по структуре схемы усилителя (однокаскадные, двухкаскадные, трансформаторные и т. д.);
- по конструктивному или технологическому исполнению;
- по назначению и области применения (маломощные усилители напряжения, усилители мощности, усилители записи или воспроизведения и т. д.)

К основным параметрам, характеризующим каскады предварительно-го усиления, относят: коэффициенты усиления (по напряжению, току и мощности), коэффициент амплитудно-частотных искажений, время установления и спад вершины импульса. Основными характеристиками усилителей являются: амплитудно-частотная, фазо-частотная и переходная характеристики.

Комплексным коэффициентом усиления усилителя по напряжению (или комплексным коэффициентом усиления) называется отношение установившегося значения напряжения сигнала на выходе к напряжению сигнала на входе устройства

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = K e^{j\varphi},$$

где K — коэффициент усиления,

$\dot{U}_{\text{ВЫХ}}$, $\dot{U}_{\text{ВХ}}$ — комплексные амплитуды напряжений на выходе и входе усилителя;

φ — аргумент комплексного коэффициента усиления, который равен фазовому сдвигу между выходным и входным напряжениями.

Сквозной коэффициент усиления (K^*) определяется соотношением

$$K^* = \dot{U}_{\text{вых}} / E_{\Gamma},$$

где E_{Γ} — ЭДС источника сигнала.

Сквозной коэффициент усиления можно найти по известному коэффициенту усиления и коэффициенту передачи входной цепи

$$K^* = \alpha K,$$

где $\alpha = R_{\text{вх}} / (R_{\text{вх}} + R_{\Gamma})$ — коэффициент передачи входной цепи.

Аналогично определяют комплексный коэффициент усиления по току и коэффициент усиления по мощности:

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_{\text{вых}}}{\dot{I}_{\text{вх}}} = K_I e^{j\varphi_I}; \quad K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}},$$

где $\dot{I}_{\text{вых}}$, $\dot{I}_{\text{вх}}$ — комплексные амплитуды тока на выходе и входе усилителя;

K_I — коэффициент усиления по току;

K_p — коэффициент усиления по мощности.

В усилителях выходное напряжение и ток сдвинуты по фазе относительно входного напряжения и тока. Основной причиной этого является наличие в цепях усилителя и его нагрузке реактивных элементов.

Обычно интерес представляют активная мощность, потребляемая от источника питания, и активная мощность, отдаваемая в нагрузку. В этом случае K_p определяется действительным числом

$$K_p = K K_I.$$

Обычно коэффициент усиления по мощности (в зависимости от количества каскадов) составляет от 10 до 10^7 .

Величину коэффициента усиления нередко выражают в логарифмических единицах (децибелах)

$$K(\text{дБ}) = 20 \lg K, \quad K_I(\text{дБ}) = 20 \lg K_I, \quad K_p(\text{дБ}) = 10 \lg K_p.$$

При последовательном включении нескольких каскадов результирующее усиление равно произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов (если K выражено в относительных единицах) или сумме (если K выражено в децибелах), например, для двухкаскадного усилителя

$$K_{\Sigma} = K_1 K_2$$

или

$$K_{\Sigma}(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}).$$

Коэффициент полезного действия (η) многокаскадного усилителя или его отдельного каскада определяют по формуле

$$\eta = P_{\text{н}} / P_0,$$

где P_n — мощность отдаваемая в нагрузку;

P_0 — мощность потребляемая от источников питания.

Амплитудно-частотной характеристикой усилителя (АЧХ) (кратко частотной характеристикой) называют зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты.

У идеального усилителя коэффициент усиления остается постоянным во всем диапазоне частот. Поэтому АЧХ идеального усилителя имеет вид прямой линии, параллельной оси частот. У реальных усилителей коэффициент усиления не остается постоянным, что приводит к отличию АЧХ реального усилителя от АЧХ идеального усилителя (рис. 2.1).

Амплитудно-частотную характеристику усилителя условно разбивают на три области: нижних, средних и верхних частот. На рис. 2.1 буквой M обозначен допустимый уровень неравномерности коэффициента усиления.

Уменьшение коэффициента усиления на нижних частотах обусловлено, в основном, влиянием разделительных конденсаторов, а в области верхних частот — ухудшением частотных свойств усилительных элементов, а также влиянием паразитных емкостей схемы.

Часто при построении АЧХ коэффициент усиления нормируют по его значению в области средних частот (K_0).

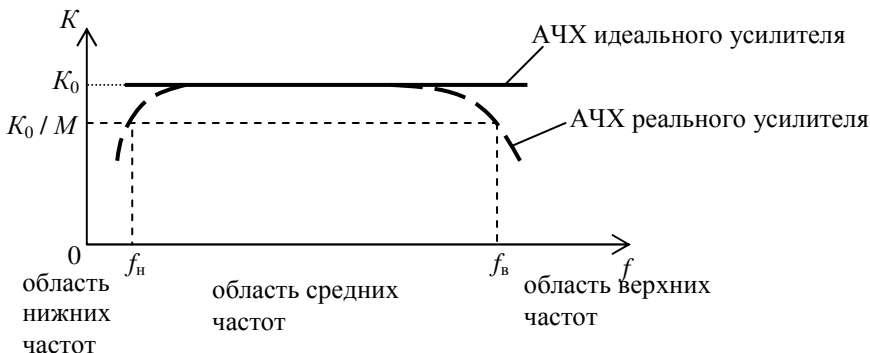


Рис. 2.1 — Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Амплитудно-частотными искажениями называют изменения формы сигнала, вызванные неодинаковым коэффициентом усиления различных гармонических составляющих сложного входного сигнала. Количественно частотные искажения оценивают коэффициентом частотных искажений M

$$M(f) = K_0 / K(f) ,$$

где K_0 — коэффициент усиления в области средних частот (номинальный коэффициент усиления);

$K(f)$ — коэффициент усиления на произвольной частоте f .

Обычно коэффициент частотных искажений находят отдельно для нижних и верхних частот

$$M_n = K_0 / K_n ; \quad M_v = K_0 / K_v.$$

Коэффициент частотных искажений показывает, во сколько раз коэффициент усиления на данной частоте меньше коэффициента усиления на средних частотах. Чем больше M отличается от единицы, тем больше вносимые усилителем частотные искажения.

Коэффициент частотных искажений может выражаться как в относительных единицах, так и в децибелах:

$$M_n(\text{дБ}) = 20 \lg M_n ; \quad M_v(\text{дБ}) = 20 \lg M_v .$$

Результирующий коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя определяется произведением коэффициентов частотных искажений его отдельных каскадов (в относительных единицах) или их суммой (в децибелах), например, для двухкаскадного усилителя

$$M_\Sigma = M_1 M_2$$

или

$$M_\Sigma (\text{дБ}) = M_1(\text{дБ}) + M_2(\text{дБ}) .$$

Диапазоном рабочих частот или полосой пропускания усилителя называют диапазон частот, в пределах которого частотные искажения не выходят за допустимые пределы.

Полосу пропускания усилителя можно определить по его АЧХ, используя заданные коэффициенты частотных искажений на нижних и верхних частотах или по заданной неравномерности АЧХ (см. рис. 2.1).

Обычно полосу пропускания определяют по уровню -3 дБ при одинаковых частотных искажениях на нижних и верхних частотах $M_n(\text{дБ}) = M_v(\text{дБ}) = -3$ дБ ($M = 1,41$). В относительных единицах это соответствует уменьшению выходной мощности в 2 раза или уменьшению коэффициентов усиления по напряжению или току на верхней и нижней граничных частотах до уровня $1/\sqrt{2} = 0,707$ от их значений на средних частотах.

Необходимый диапазон рабочих частот усилителя определяется назначением усилителя. Он выбирается в соответствии со спектральным составом усиливаемых сигналов и допустимыми искажениями.

В отдельных случаях, например, в измерительной аппаратуре допустимые частотные искажения, которые определяются допустимой погрешностью прибора в диапазоне частот, могут составлять десятые или сотые доли децибела.

Фазо-частотная характеристика усилителя (ФЧХ) — это зависимость от частоты фазового сдвига выходного напряжения относительно входного напряжения при усилении гармонического колебания.

Вносимые усилителем фазовые сдвиги изменяют взаимное расположение гармонических составляющих в сложном выходном сигнале. Вызываемые этим изменения формы выходного сигнала называются фазо-частотными искажениями.

Известно, что ФЧХ, не искажающая форму усиливаемых колебаний, представляет собой линейную зависимость фазового сдвига от частоты [8]

$$\varphi(f) = -t_3 2\pi f,$$

где $\varphi(f)$ — фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями,

t_3 — время задержки,

f — частота, на которой производится измерение фазового сдвига.

В случае идеальной ФЧХ фазовый сдвиг φ прямо пропорционален частоте. Угол наклона идеальной ФЧХ, проходящей через начало координат, определяет время запаздывания усиленного сигнала на выходе усилителя. Если угол наклона фазовой характеристики равен нулю (фазовый сдвиг во всем диапазоне частот равен нулю), то сигнал на выходе появляется одновременно с входным (без какой-либо задержки).

Оценку фазовых искажений, вносимых усилителем, производят по его ФЧХ (см. рис. 2.2).

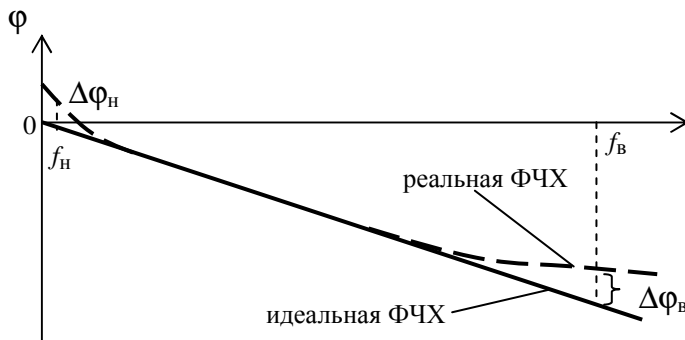


Рис. 2.2 — Фазо-частотная характеристика усилителя

Фазовые искажения — это отличие фазового сдвига на данной частоте реального усилителя от фазового сдвига на этой же частоте в усилителе с идеальной ФЧХ.

В очень широком диапазоне интенсивности звуков человеческое ухо не реагирует на изменение фазовых соотношений между отдельными компонентами. Поэтому в одноканальных усилителях речи и музыки фазовые искажения обычно не нормируют.

Фазовые искажения необходимо учитывать в усилителях фазометрических систем, стереофонических усилителях, устройствах, охваченных глубокой обратной связью, а также в усилителях для высококачественного воспроизведения формы колебаний (телевидение, осциллография и т. п.).

Частотные и фазовые искажения называются линейными, так как они создаются реактивными элементами схемы (емкостями и индуктивностями), которые являются линейными элементами.

Переходной характеристикой (ПХ) усилителя называют реакцию усилителя на единичный скачок входного напряжения. Переходная характеристика описывает процесс перехода усилителя из одного устойчивого состояния в другое.

При усилении прямоугольных импульсных сигналов в усилителе происходит скачкообразное изменение входного сигнала. Это приводит к возникновению переходных процессов, обусловленных наличием в каскадах усилителя реактивных элементов. При этом сигнал на выходе усилителя устанавливается не сразу, а спустя некоторое время, определяемое видом переходной характеристики, что приводит к отличию формы сигнала на выходе от формы входного сигнала, т. е. к искажению сигнала.

Искажения импульса делят на два вида: искажения фронта и искажения вершины импульса. Искажения фронта определяют по переходной характеристике в области малых времен (рис. 2.3) и оценивают временем установления $\tau_{уст}$ и выбросом фронта δ . Искажения вершины определяют по ПХ в области больших времен (рис. 2.4) и оценивают величиной Δ , которую называют — спад вершины.

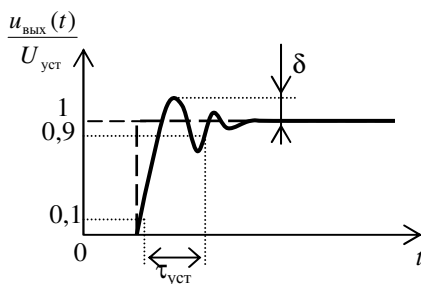


Рис. 2.3 — Искажения фронта прямоугольного импульса

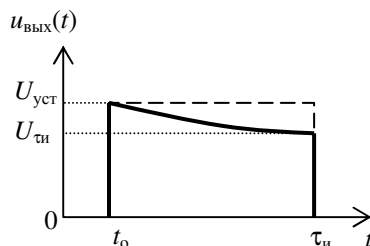


Рис. 2.4 — Искажения вершины прямоугольного импульса

Время установления импульса ($\tau_{уст}$) — это время, за которое выходное напряжение нарастает от уровня 0,1 до уровня 0,9 своего установившегося значения $U_{уст}$.

Выброс фронта (δ) — это максимальное превышение мгновенным значением выходного напряжения над его установившимся значением, которое выражается в процентах от установившегося значения. При колебательном характере переходного процесса оценке подлежит наибольший из выбросов.

По ПХ в области малых времен (рис. 2.3) иногда определяют скорость нарастания выходного напряжения $V_{U_{вых}} = \frac{dU_{вых}}{dt} \cdot V_{U_{вых}}$ — это скорость нарастания выходного напряжения за время его изменения от уровня 0,1 до уровня 0,9 установившегося значения.

Кроме этих основных параметров иногда дополнительно оценивают длительность фронта $\tau_{ф}$, время задержки τ_z (условная величина, оцениваемая по времени достижения переходным процессом уровня 0,5 установившегося значения) и отрицательный выброс заднего фронта импульсного сигнала $\delta_{обр}$.

Для определения искажений вершины импульса используют ПХ в области больших времен (рис. 2.4). Искажения вершины импульса оценивают спадом выходного напряжения Δ за время длительности импульса

$$\Delta = \frac{U_{уст} - U_{\tau}}{U_{уст}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{уст}$ — установившееся напряжения на выходе усилителя;

U_{τ} — напряжения на выходе усилителя в момент окончания импульса.

В многокаскадном усилителе результирующее время установления приближенно оценивается выражением

$$\tau_{уст\Sigma} \approx \sqrt{\tau_{уст1}^2 + \tau_{уст2}^2 + \tau_{уст3}^2 + \dots} ,$$

где $\tau_{уст1}^2, \tau_{уст2}^2, \tau_{уст3}^2, \dots$ — время установления первого, второго, третьего и т. д. каскадов усилителя.

Спад вершины многокаскадного усилителя

$$\Delta_{\Sigma} \approx \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots ,$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$ — спад вершины первого, второго, третьего и т.д. каскадов многокаскадного усилителя.

Следует отметить, что частотная, фазовая и переходная характеристики усилителя жестко связаны друг с другом, так как они обусловлены одной и той же причиной — наличием в схеме усилителя реактивных эле-

ментов. Поэтому, если изменяется вид АЧХ, то изменяется и ПХ этого устройства.

Строгое аналитическое определение переходной характеристики по известной зависимости комплексного коэффициента усиления от частоты выполняют с помощью преобразования Лапласа, но для реальных схем усилителей, обычно содержащих большое число реактивных элементов, оно довольно сложное. Анализ показывает, что спад вершины импульса определяется коэффициентом усиления на низких частотах (если $f_n \rightarrow 0$, то спад вершины импульса также $\Delta \rightarrow 0$), а время установления — коэффициентом усиления на высоких частотах (если $f_v \rightarrow \infty$ то время установления $\tau_{уст} \rightarrow 0$).

Скоростные параметры усилителя оценивают динамическими искажениями. Динамические искажения возникают в случае, если амплитуда и частота усиливаемого сигнала превышают критические значения, определяемые максимальной скоростью нарастания выходного напряжения усилителя.

Максимальная скорость нарастания гармонического сигнала зависит от частоты и амплитуды сигнала и определяется по формуле

$$V_{Uc} = 2\pi f U_m ,$$

где U_m — амплитуда гармонического напряжения.

Если скорость изменения входного усилителя будет больше, чем максимальная скорость нарастания его выходного напряжения, определяемая по его переходной характеристике, то усиливаемый сигнал будет искажен. Поэтому необходимо, чтобы скорость нарастания выходного напряжения усилителя была больше скорости изменения напряжения сигнала

$$V_{Uвых} > V_{Uc} = 2\pi f U_m ,$$

где $V_{Uвых}$ — скорость нарастания выходного напряжения усилителя.

При отсутствии сигнала на входе работающего усилителя на его выходе всегда присутствует некоторое напряжение, называемое напряжением собственных шумов усилителя. Собственные или внутренние шумы не позволяют усиливать сигналы малой амплитуды, подавляя их. Поэтому при проектировании и конструировании усилителей принимают все возможные меры для снижения уровня собственных шумов.

Основными составляющими напряжения собственных шумов являются: шумы активных сопротивлений схемы, шумы транзисторов, наводки, фон источников питания и др.

Мощность шума, действующая на выходе усилителя, складывается из мощности шумов источника входного сигнала, усиленных усилителем, и мощности собственных шумов усилителя. Если усилитель не шумит (иде-

альный усилитель с точки зрения шумов), то его мощность шума на выходе

$$P_{\text{ш.вых.ид.}} = P_{\text{ш.вх.}} K_p,$$

где K_p — коэффициент усиления усилителя по мощности,

$P_{\text{ш.вх.}}$ — мощность шумов источника сигнала, действующего на входе усилителя.

Величину, показывающую во сколько раз мощность шумов на выходе реального усилителя больше мощности шумов на выходе идеального усилителя, называют коэффициентом шума

$$F_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш.вых}}}{P_{\text{ш.вх.}} K_p}.$$

Коэффициент шума характеризует, во сколько раз ухудшается отношение мощности сигнала к мощности шума при прохождении смеси сигнала и шума через усилитель.

$$F_{\text{ш}} = \frac{\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх}}}{\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вых}}},$$

где $(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$ — отношение мощности сигнала к мощности шума на входе усилителя;

$(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}}$ — отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе усилителя;

Чем больше собственный шум усилителя, тем больше коэффициент шума $F_{\text{ш}}$ отличается от единицы. Для идеального нешумящего усилителя — $F_{\text{ш}} = 1$.

Коэффициент шума часто выражают в логарифмических единицах

$$F_{\text{ш. (дБ)}} = 10 \lg F_{\text{ш}}.$$

Напряжение собственных шумов правильно сконструированного усилителя определяется лишь тепловыми шумами входной цепи и шумами первого усилительного элемента.

Амплитудной характеристикой (АХ) усилителя называют зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения

$$U_{\text{вых } m} = f(U_{\text{вх } m}).$$

Так как коэффициент усиления идеального усилителя представляет собой постоянную величину, не зависящую от величины входного сигнала, его амплитудная характеристика представляет собой прямую, угол на-

клона которой определяется коэффициентом усиления усилителя (см. рис. 2.5). Амплитудная характеристика реального усилителя отличается от АХ идеального усилителя.

Если напряжение, поданное на вход усилителя, меньше, чем $U_{\text{вх.мин}}$, то на выходе реального усилителя этот сигнал будет маскироваться (заглушаться) напряжением собственных шумов усилителя $U_{\text{ш}}$. При значительном увеличении входного напряжения увеличиваются нелинейные искажения, часто проявляющиеся в виде ограничения выходного сигнала по амплитуде.

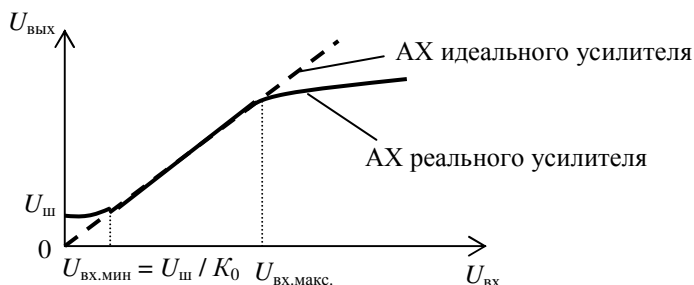


Рис. 2.5 — Амплитудная характеристика усилителя

Отношение $U_{\text{вх.макс.}}/U_{\text{вх.мин.}}$ в пределах линейной части амплитудной характеристики характеризует диапазон напряжений сигнала, усиливаемых данным усилителем без искажений, его называют динамическим диапазоном усилителя. Он выражается в относительных или логарифмических единицах:

$$D = U_{\text{вх.макс.}}/U_{\text{вх.мин.}}; \quad D(\text{дБ}) = 20\lg D.$$

Нелинейными искажениями называются искажения формы выходного сигнала, вызванные наличием в схеме усилителя нелинейных элементов.

Усилительные элементы (транзисторы) при работе с сигналами большой амплитуды обладают заметной нелинейностью и обычно являются основной причиной возникновения нелинейных искажений в усилителях. Поскольку входные и выходные характеристики транзисторов являются нелинейными, то при подаче на вход усилителя синусоидального сигнала выходной сигнал будет искажен и его форма может заметно отличаться от синусоидальной. Так как спектр сигнала однозначно связан с формой сигнала, то помимо основной частоты выходной сигнал (искаженная по форме синусоида) содержит кроме основной частоты высшие гармоники: вторую, третью и т. д.

Появление на выходе усилителя частотных составляющих, отсутствующих в спектре входного сигнала, является характерной особенностью нелинейных устройств.

В основу метода определения вносимых усилителем нелинейных искажений положена зависимость изменения спектра синусоидального сигнала от величины вносимых нелинейных искажений. При усилении гармонических колебаний нелинейные искажения принято оценивать коэффициентом гармоник K_r .

Коэффициент гармоник измеряется на выходе усилителя при синусоидальном входном сигнале и определяется выражением

$$K_r = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}{P_1}},$$

где K_r — коэффициент гармоник;

P_1 — мощность первой гармоники на выходе усилителя;

P_2, P_3, P_4 — мощности второй, третьей, четвертой и т. д. гармоник на выходе усилителя, созданных нелинейными элементами.

При активной нагрузке усилителя отношение мощностей можно заменить отношением квадратов напряжения (или тока), беря действующие или амплитудные значения этих величин. В этом случае

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1},$$

где U_1 — напряжение первой гармоники на выходе усилителя;

$U_2, U_3, U_4, \dots$ — напряжения второй, третьей, четвертой и т. д. гармоник на выходе усилителя.

Основной вклад в нелинейные искажения вносит окончанный каскад усилителя.

Допустимый уровень нелинейных искажений определяются назначением усилителя. В высококачественных усилителях речевого и музыкального сигнала допускают коэффициент гармоник порядка (0,1...0,5)%. В усилителях среднего качества — (1...3)%. Усилители систем многоканальной связи, чтобы устранить возможность появления комбинационных частот, должны обладать высокой степенью линейности ($K_r < 0,01\%$).

При усилении импульсных сигналов нелинейность усилителя сказывается иначе, чем при усилении гармонических сигналов. В некоторых случаях, например, при усилении прямоугольных импульсов постоянной амплитуды, нелинейность усилителя практически не отражается на форме выходных импульсов и поэтому обычно не ограничивается. При усилении импульсов с наклонным фронтом (пилообразные, треугольные и др.) нелинейность искривляет наклонный фронт импульса.

Некоторые устройства аналоговой обработки сигналов характеризуются, кроме приведенных выше параметров, также специфическими показателями. Например, для операционных усилителей — это входные токи, разбаланс входных токов, входное напряжение смещения нуля, коэффициент ослабления синфазных входных напряжений и др. Эти параметры обычно рассматривают в соответствующих разделах, посвященных изучению этих устройств.

Литература по теме: [1, с. 18 — 39]; [2, с. 8 — 29]; [3, с. 11 — 34]; [6, с. 8 — 46].

Контрольные вопросы по теме

1. Каковы основные области применения устройств аналоговой обработки сигналов?
2. Приведите классификацию усилителей.
3. Назовите основные элементы усилительных каскадов и их назначение.
4. Дайте краткую характеристику истории развития теории и техники усилительных устройств.
5. Какие усилительные элементы используют в усилительной технике?
6. Перечислите основные характеристики усилителя.
7. Что называется коэффициентом усиления усилителя? Как определяется коэффициент многокаскадного усилителя?
8. Что такое фазовый сдвиг в усилителе? Каковы причины его появления?
9. Что такое к.п.д. усилителя? В чем отличие промышленного от к.п.д. выходной цепи?
10. Объясните, почему коэффициент усиления напряжения (тока) является комплексной величиной.
11. Что называется динамическим диапазоном усилителя, динамическим диапазоном сигнала? Чем он ограничен?
12. Перечислите основные причины возникновения собственных шумов в усилителе. Перечислите способы уменьшения напряжения шумов. Дайте определение коэффициента шума.
13. Дайте определения коэффициентам линейных искажений. Каковы причины их возникновения? Идеальная и реальная амплитудно-частотные характеристики.
14. Что называется фазо-частотной характеристикой? Идеальная и реальная фазо-частотные характеристики.

15. Какими коэффициентами искажений оцениваются усилители гармонических и импульсных колебаний?

16. С какой целью проводится оценка фазовых и частотных искажений усилителя? Каково условие отсутствия частотных и фазовых искажений.

17. Как оценивают переходные искажения в усилителе? Как связаны между собой переходные и частотные искажения?

18. Какие искажения называются линейными? Каковы причины появления линейных искажений в области низких и верхних частот?

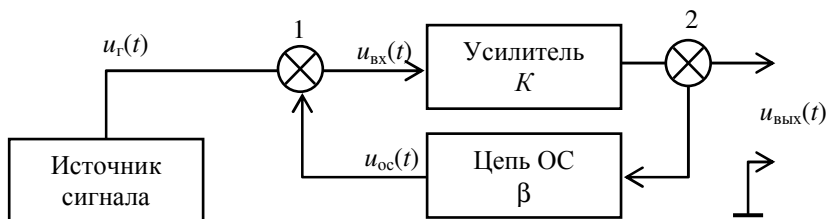
19. Какова причина возникновения нелинейных искажений в усилителях? Методы оценки нелинейных искажений.

20. Почему амплитудно-частотная, фазовая и переходная характеристики оказываются взаимосвязанными?

21. Как оценивают нелинейность в импульсных усилителях?

2.2. Обратная связь в усилительных устройствах

Обратной связью (ОС) называют такую связь между цепями усилителя, посредством которой энергия передается из последующих цепей или каскадов в предыдущие, то есть в направлении обратном тому, которое имеет место в процессе усиления сигналов (рис. 2.6).



1 — устройство ввода сигнала ОС;

2 — устройство снятия сигнала ОС

Рис. 2.6 — Структурная схема усилителя с обратной связью

Обратная связь может сильно влиять на свойства и характеристики усилителя. Разработка усилителя с параметрами, удовлетворяющими современным требованиям, невозможно без использования обратной связи.

Различают следующие виды обратной связи:

1) внешнюю обратную связь, обусловленную введением специальных цепей преднамеренно создающих по желанию разработчика в каскаде или усилителе обратную связь для изменения свойств в нужном направлении;

2) паразитную обратную связь, обусловленную неудачным расположением и монтажом усилительных каскадов или неидеальностью элементов, когда паразитные емкостные и индуктивные связи создают путь для передачи колебаний с выхода на вход.

Если при сложении колебаний источника сигнала с колебаниями, поступающими с выхода через цепь обратной связи, амплитуда результирующего колебания на входе усилителя возрастает, то такую ОС называют положительной обратной связью (ПОС), если амплитуда результирующего колебания уменьшается, то такую ОС называют отрицательной обратной связью (ООС).

При ПОС колебания на входе складываются в фазе, при ООС — в противофазе.

В усилителях положительная обратная связь обычно является вредной, так как может вызвать самовозбуждение усилителя. Присущие усилителям фазовые сдвиги изменяются с изменением частоты, поэтому обратная связь, отрицательная на одних частотах, может превратиться в положительную на других. Обычно изменение знака ОС происходит за пределами рабочего диапазона частот.

Величину $F = 1 + \beta K$ называют глубиной обратной связи.

Если коэффициент передачи β цепи ОС остается постоянным в полосе рабочих частот, то такую обратную связь называют частотонезависимой, если не остается постоянным, то называют частотнозависимой.

Обратная связь может быть по постоянной и переменной составляющим, а также регулируемой (переменной).

По способу снятия различают обратную связь по току, напряжению и комбинированную. Способ снятия ОС необходимо учитывать при определении влияния ОС на выходное сопротивление усилителя.

По способу ввода обратной связи различают последовательную, параллельную и комбинированную по способу ввода обратную связь. Способ ввода ОС необходимо учитывать при определении влияния ОС на входное сопротивление усилителя.

При всех способах снятия и ввода обратной связи коэффициент усиления усилителя с отрицательной и положительной обратной связью определяют из соотношений:

$$K_{\text{ООС}}^* = \frac{K^*}{1 + \beta K^*} ;$$

$$K_{\text{ПОС}}^* = \frac{K^*}{1 - \beta K^*} ,$$

где $K_{\text{ООС}}^*$ и $K_{\text{ПОС}}^*$ — коэффициенты усиления усилителя охваченного отрицательной и положительной ОС;

K^* — коэффициент усиления усилителя без ОС;
 β — коэффициент передачи цепи обратной связи.

Видно, что ООС снижает коэффициент усиления устройства.

Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления усилителя. При выполнении условия $\beta K^* = 1$ коэффициент усиления становится бесконечно большим, что физически соответствует самовозбуждению усилителя.

Частотно независимая ООС, уменьшая усиление усилителя, уменьшает его частотные искажения и расширяет полосу пропускания

$$M_{\text{оос}} = \frac{M - 1}{1 + \beta K^*} + 1 ,$$

где $M_{\text{оос}}$ и M — коэффициенты частотных искажений усилителя, охваченного ООС и без ОС.

При введении частотно зависимой ОС коэффициент передачи цепи ОС β изменяет свою величину в рабочей полосе частот. При этом АХЧ усилителя приобретает подъемы и спады. Частотно зависимую ОС используют для корректирования характеристик в области нижних, средних и верхних частот, в регуляторах тембра, для конструирования частотно избирательных усилителей и т. д.

Введение ООС в усилитель, обладающий нелинейной амплитудной характеристикой, линеаризирует ее. Следствием этого является то, что при одном и том же уровне выходного напряжения коэффициент гармоник усилителя, охваченного ООС, оказывается меньше, чем коэффициент гармоник усилителя без обратной связи

$$K_{\Gamma \text{ оос}} = \frac{K_{\Gamma}}{1 + \beta K^*} ,$$

где $K_{\Gamma \text{ оос}}$ и K_{Γ} — коэффициенты гармоник усилителя охваченного ООС и без ОС.

Коэффициент усиления усилительного каскада и положение его точки покоя изменяются под воздействием различных дестабилизирующих факторов. Введение ООС по переменной составляющей уменьшает неустойчивость усиления усилителя во столько же раз, во сколько она уменьшает его сквозной коэффициент усиления. Это позволяет создавать высокостабильные усилители, находящие применение в измерительной технике, системах многоканальной связи и т. д.

Введение ООС по постоянной составляющей повышает стабильность положения точки покоя

$$dq_{\text{оос}} = \frac{dq}{1 + \beta K^*} ,$$

где $dq_{\text{оос}}$ — нестабильность сквозного коэффициента усиления (положения точки покоя) усилителя охваченного ООС;

dq — нестабильность усилителя без ООС.

Введение обратной связи изменяет как входное, так и выходное сопротивления усилителя, который она охватывает. Характер изменения входного сопротивления определяется способом введения обратной связи во входную цепь усилителя и не зависит от способа ее снятия с выходной цепи. Характер изменения выходного сопротивления определяется способом снятия напряжения обратной связи с выходной цепи и не зависит от способа ее введения во входную цепь.

Входное сопротивление усилителя при последовательной по способу ввода положительной и отрицательной обратной связи:

$$Z_{\text{вх.ПООС}} = Z_{\text{вх}} (1 - \beta K) ;$$

$$Z_{\text{вх.ООС}} = Z_{\text{вх}} (1 + \beta K) ,$$

где $Z_{\text{вх.ПООС}}$ и $Z_{\text{вх.ООС}}$ — полное входное сопротивление усилителя охваченного, соответственно, положительной и отрицательной обратной связью;

$Z_{\text{вх}}$ — полное входное сопротивление усилителя без ОС.

Последовательная отрицательная обратная связь увеличивает входное сопротивление той части усилителя, которую она охватывает. Если входное сопротивление имеет активную и емкостную составляющие, то последовательная ООС, увеличивая полное входное сопротивление, увеличивает активную составляющую входного сопротивления и уменьшает входную емкость:

$$R_{\text{вх.ООС}} = R_{\text{вх}} (1 + \beta K) ;$$

$$C_{\text{вх.ООС}} = C_{\text{вх}} / (1 + \beta K) .$$

Входная проводимость усилителя при параллельной отрицательной обратной связи определяется следующим выражением

$$Y_{\text{вх.ООС}} = Y_{\text{вх}} + Y_{\text{ОС}} (1 + K) ,$$

где $Y_{\text{вх.ООС}}$ — входная проводимость усилителя охваченного ООС;

$Y_{\text{вх}}$ — входная проводимость усилителя без ОС;

$Y_{\text{ОС}}$ — проводимость в цепи обратной связи.

Соответственно входное сопротивление

$$Z_{\text{вх.ООС}} = \frac{1}{Y_{\text{вх.ООС}}} = \frac{Z_{\text{вх}} Z_{\text{ОС}}}{Z_{\text{вх}} (1 + K) + Z_{\text{ОС}}} .$$

При параллельной отрицательной обратной связи входная цепь усилителя шунтируется уменьшенным в $(1 + K)$ раз сопротивлением обратной

связи, что уменьшает входное сопротивление той части усилителя, которая охвачена ОС.

При параллельной ПОС входная проводимость определяется соотношением

$$Y_{\text{вх.ПОС}} = Y_{\text{вх}} + Y_{\text{ос}}(1 - K) .$$

Откуда видно, что параллельная ПОС при $K > 1$ уменьшает входную проводимость и соответственно увеличивает входное сопротивление.

Отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает выходное сопротивление устройства

$$Z_{\text{вых.ООС}} = \frac{Z_{\text{вых}}}{1 + \dot{K}^*} .$$

Отрицательная обратная связь по току увеличивает выходное сопротивление устройства

$$Z_{\text{вых.ООС}} = Z_{\text{вых.}} (1 + \dot{K}^*) .$$

Таким образом, использование отрицательной обратной связи в зависимости от способа ее ввода или снятия позволяет изменить как входное, так и выходное сопротивление устройства в нужную сторону.

Литература по теме: [1, с. 41 — 67]; [2, с. 30 — 47]; [3, с. 52 — 79]; [5, с. 49 — 100].

Контрольные вопросы по теме

22. Для каких целей используется обратная связь в усилителях? Как она влияет на основные характеристики усилителя?

23. В чем отличие положительной обратной связи от отрицательной?

24. Какие существуют способы введения обратной связи? Чем они отличаются друг от друга?

25. Что такое обратная связь по току и напряжению?

26. Как влияет отрицательная обратная связь на коэффициент усиления и его стабильность?

27. Какого вида обратные связи увеличивают входное сопротивление усилителя?

28. Какого вида обратные связи уменьшают входное сопротивление усилителя?

29. Что называется частотно зависимой обратной связью? Как она влияет на АЧХ усилителя? Где используется частотно зависимая ОС?

30. Почему в области высоких частот возможен переход отрицательной обратной связи в положительную и к чему это приводит?

31. Как влияет отрицательная обратная связь на линейные и нелинейные искажения сигнала в усилителе? Приведите расчетные соотношения.

32. Как изменится форма АЧХ усилителя с отрицательной обратной связью, если в цепь обратной связи включен последовательный (или параллельный) колебательный контур?

2.3. Обеспечение режима работы усилительных элементов по постоянному току

Известно, что токи и напряжения транзистора существенно зависят от температуры окружающей среды. Если не предусмотреть мер по стабилизации режима, то в значительной степени при изменении температуры будут изменяться и параметры транзистора.

Для нормальной работы усилительного каскада ток покоя выходной цепи при изменении температуры, старении транзисторов и их замене не должен сильно отклоняться от своего номинального значения. Чрезмерное уменьшение тока покоя ведет к росту нелинейных искажений, уменьшению мощности сигнала на выходе, уменьшению усиления. Увеличение тока покоя снижает к.п.д. каскада, приводит к перегреву усилительного элемента и также может увеличить нелинейные искажения. Отклонение тока покоя от нормального значения в режиме *A* обычно допускается не более $\pm 10\%$ в каскадах мощного усиления и не более $\pm 20\%$ в маломощных каскадах предварительного усиления.

Транзистор может управляться как входным током, так и входным напряжением. Поэтому различают две схемы установки напряжения смещения входной цепи: от источника неизменного тока (рис. 2.7) и от источника неизменной ЭДС (рис. 2.8).

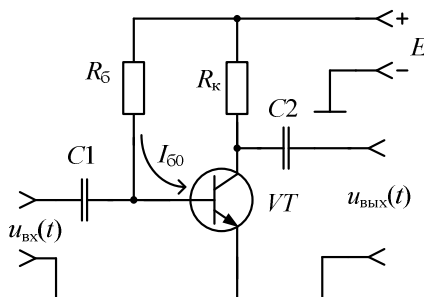


Рис. 2.7 — Усилительный каскад с фиксированным током базы

Ток базы в схеме, изображенной на рис. 2.7, равен: $I_b = E / (R_b + r_{бэ})$, где $r_{бэ}$ — сопротивление перехода база-эмиттер транзистора.

Обычно выбирают сопротивление $R_6 \gg r_{63}$, тогда $I_6 \cong E/R_6$. Откуда видно, что ток базы не зависит от параметров транзистора и определяется величиной внешнего сопротивления R_6 . Так как аналогичный результат получается при питании цепи базы от идеального источника тока, то такую схему подачи смещения называют схемой с фиксированным током базы.

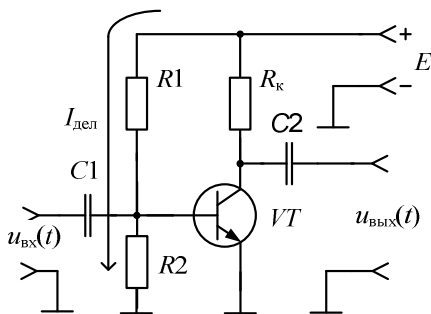


Рис. 2.8 — Усилительный каскад с фиксированным напряжением база-эмиттер

В схеме, изображенной на рис. 2.8, смещение на базу подают от делителя напряжения, образованного резисторами $R1$ и $R2$. Эту схему подачи смещения во входную цепь называют смещение фиксированным напряжением база-эмиттер. Чтобы напряжение U_{63} не зависело от параметров транзистора, необходимо выбрать ток делителя значительно превышающем ток базы транзистора $I_{дел} \gg I_6$.

При смещении фиксированным напряжением база-эмиттер (рис. 2.8) и смещении фиксированным током базы (рис. 2.7), замена транзистора или изменение температуры (на $20^\circ\text{C} \dots 50^\circ\text{C}$) существенно изменяют ток покоя коллектора транзистора (в 2 и более раз). Что приемлемо лишь в некоторых случаях, например, в простых лабораторных схемах и т. д.

Практически широкое распространение получили схемы со стабилизацией положения точки покоя путем введения отрицательной обратной связи. Различают три схемы стабилизации:

- коллекторная,
- эмиттерная,
- комбинированная стабилизация.

Простейшей и наиболее экономичной является коллекторная стабилизация, в которой стабилизация положения точки покоя осуществляется с помощью параллельной ООС по напряжению, снимаемой с коллектора транзистора (рис. 2.9).

Коллекторная стабилизация удовлетворительно действует лишь при большом падении напряжении по постоянной составляющей на коллек-

торной нагрузке R_K (порядка $0,5E$, где E — напряжение питания схемы), не слишком больших разбросах статического коэффициента усиления тока h_{23} (не более чем в 1,5...2 раза) и изменении температуры транзистора не более (20 ... 30)°C.

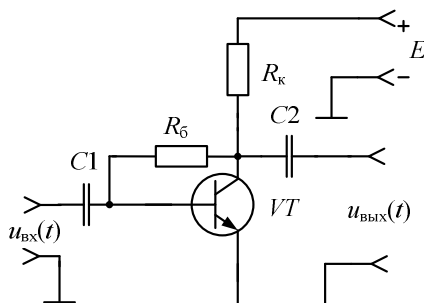


Рис. 2.9 — Каскад с коллекторной стабилизацией точки покоя

При включении транзистора по схеме с общим эмиттером коллекторная стабилизация уменьшает входное сопротивление каскада и его усиление из-за прохождения сигнала через R_6 во входную цепь. Для устранения этого недостатка R_6 делят на две части (R_{61} и R_{62}) и заземляют среднюю точку цепи R_{61} , R_{62} по переменной составляющей.

Более высокую стабильность точки покоя обеспечивает схема эмиттерной стабилизации (рис. 2.10), которая находит наиболее широкое применение. Эта схема может обеспечивать работоспособность каскада при изменении h_{213} транзистора в 5...10 раз и изменении его температуры на 70...100°C.

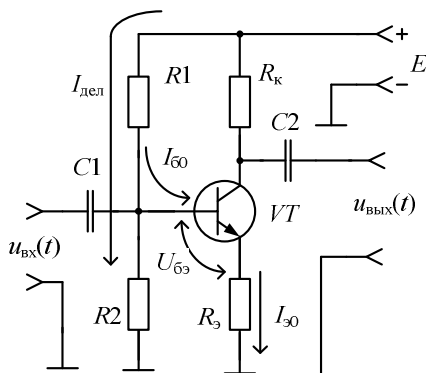


Рис. 2.10 — Усилительный каскад с эмиттерной стабилизацией

Стабилизация происходит за счет возникновения напряжения обратной связи на сопротивлении R_3 . При этом напряжение между базой и эмиттером оказывается равным

$$U_{бэ} = U_{R2} - U_{R3} = I_{дел}R_2 - I_0R_3.$$

Если с увеличением температуры возрастает ток коллектора, то это приводит к увеличению тока эмиттера I_0 , а, следовательно, уменьшению напряжения смещения $U_{бэ}$. Уменьшение $U_{бэ}$ противодействует увеличению тока коллектора. В результате устанавливается новое динамическое равновесие в схеме, при котором изменение тока коллектора оказывается меньше, чем в случае отсутствия резистора в эмиттерной цепи ($R_3 = 0$).

Для устранения обратной связи в рабочей полосе частот по переменной составляющей, снижающей усиление каскада, резистор R_3 обычно шунтируют конденсатором C_3 большой емкости, практически «закорачивающим» R_3 для частот напряжения сигнала.

Эмиттерная стабилизация хорошо работает как при большом, так и при малом падении напряжения на нагрузке R_k , а потому применима и для трансформаторных каскадов, где коллекторная стабилизация неприменима. Эффективность эмиттерной стабилизации увеличивается при увеличении сопротивления резистора R_3 и уменьшении сопротивлений делителя R_1, R_2 .

Схема комбинированной стабилизации (рис. 2.11) представляет собой комбинацию рассмотренных выше способов стабилизации. Она имеет место, например, при включении в каскад с эмиттерной стабилизацией резистора R_Φ фильтра по цепи питания $R_\Phi C_\Phi$ и обеспечивает стабильность выходного тока даже немного большую, чем схема с эмиттерной стабилизацией.

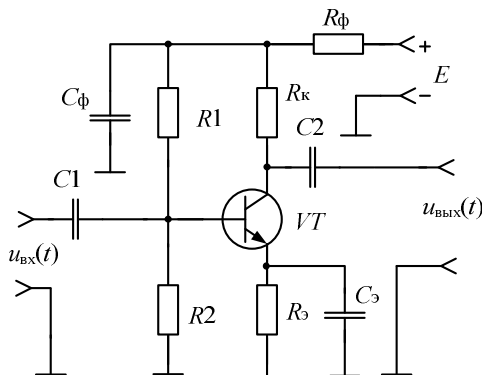


Рис. 2.11 — Усилительный каскад с комбинированной стабилизацией

В многокаскадных усилителях с непосредственной связью между каскадами стабилизация режима работы по постоянному току усилительного тракта в целом осуществляется за счет охвата этого тракта общей петлей отрицательной обратной связи по постоянной составляющей.

В ряде случаев в нижнее плечо базового делителя включают прямосмещенный диод (рис. 3.6), транзистор в диодном включении или терморезистор. Благодаря этому напряжение смещения в базовой цепи изменяется при изменении температуры таким образом, что воздействие изменения температуры на ток коллектора во многом нейтрализуется.

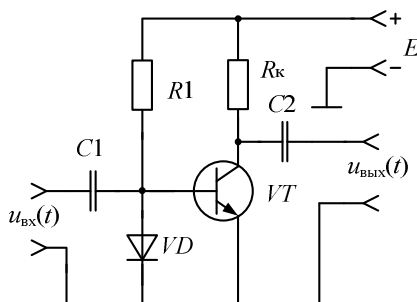


Рис. 2.12 — Усилительный каскад с термокомпенсацией, осуществляемой с помощью прямосмещенного диода

Так как температурные коэффициенты транзистора и термокомпенсирующего диода (транзистора в диодном включении) одинаковы, то при надежном тепловом контакте между транзистором и термокомпенсирующим диодом влияние изменения температуры может оказаться полностью скомпенсированным. В случае использования терморезистора схема несколько усложняется, так как для подбора температурных коэффициентов необходимо использовать дополнительные резисторы.

Литература по теме: [2, с.48 — 97]; [1, с.69 — 159]; [2, с.48 — 121]; [3, с.101 — 135]; [5, с.116 — 231].

Контрольные вопросы по теме

33. Укажите способы подачи смещения во входную цепь транзистора. Сформулируйте требования к элементам цепи смещения.

34. Нарисуйте схему коллекторной стабилизации, поясните ее принцип действия.

35. Нарисуйте схему эмиттерной стабилизации, поясните ее принцип действия.

36. Назовите основные причины неустойчивости рабочей точки усилительного каскада.

37. Каким должен быть выбран температурный коэффициент сопротивления нижнего (верхнего) плеча делителя для температурной компенсации положения точки покоя усилительного каскада на биполярном транзисторе?

38. Поясните достоинства и недостатки стабилизации точки покоя усилительных каскадов с помощью отрицательной обратной связи и с помощью термочувствительных элементов.

39. Каковы особенности стабилизации точки покоя в каскадах на полевых транзисторах?

40. Каковы особенности стабилизации режима работы транзистора в многокаскадных усилителях с непосредственной связью?

41. Назовите достоинства и недостатки температурной стабилизации режима работы транзисторов с помощью термочувствительных элементов.

42. Чем вызвана необходимость стабилизации точки покоя выходной цепи транзистора?

2.4. Каскады предварительного усиления

Каскады предварительного усиления предназначены для повышения уровня напряжения, поступающего от источника сигнала, до величины необходимой для нормальной работы оконечного усилителя. В них осуществляют необходимые регулировки и коррекцию АЧХ.

Одним из основных требований, предъявляемых к каскадам предварительного усиления, является получение возможно большего усиления от каждого каскада. Свойства каскадов предварительного усиления оценивают в первую очередь по коэффициенту усиления, а такие параметры, как КПД, выходная мощность и некоторые другие не являются определяющими.

Малый уровень усиливаемого сигнала позволяет считать активные элементы усилительной схемы линейными и заменить их для целей анализа линейными эквивалентными схемами.

Методика анализа заключается в следующем. С учетом реальных параметров элементов область рабочих частот можно разбить на три участка.

Первый участок — это область средних частот, где разделительные конденсаторы имеют ничтожно малое сопротивление и их заменяют проводниками. Паразитные емкости имеют большое сопротивление, и их влияние не учитывают.

Второй участок — это область нижних частот, где существенное влияние оказывают разделительные конденсаторы, конденсаторы в цепи эмиттера и трансформаторы (если они входят в состав схемы).

Третий участок — область верхних частот, где проявляется влияние паразитных емкостей схемы, а также ухудшение усилительных свойств усилительных элементов.

Задача анализа усилительного каскада разбивается на три более простые задачи: анализ в области средних, нижних и верхних частот.

Проведем анализ каскада с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 2.13) в области средних частот. На эквивалентной схеме каскада большими буквами обозначены внешние элементы схемы, а маленькими — элементы эквивалентной схемы транзистора. Здесь обозначено: R_r — внутреннее сопротивление источника сигнала; $R1 // R2$ — сопротивление параллельно включенных резисторов $R1$ и $R2$, образующих делитель напряжения на входе; R_k — сопротивление коллекторной цепи; R_n — сопротивление нагрузки, обычно равное входному сопротивлению следующего каскада; r_6 — объемное сопротивление базы транзистора; r_3 — дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер; r_k — дифференциальное сопротивление коллекторного $p-n$ перехода; h_{213} — дифференциальный коэффициент передачи по току транзистора в схеме с общим эмиттером; $h_{213}I_6$ — источник тока, управляемый током базы.

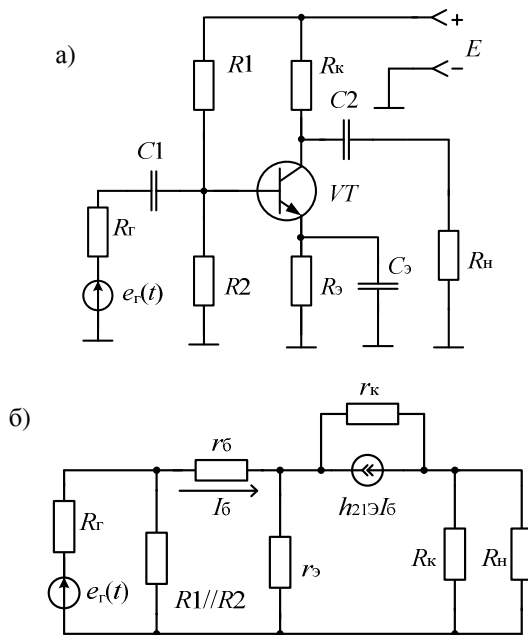


Рис. 2.13 — Каскад с общим эмиттером (а) и его эквивалентная схема в области средних частот (б)

Из анализа эквивалентной схемы можно найти, что входное сопротивление каскада определяется выражением

$$R_{\text{вх}} = R_1 // R_2 // h_{11\text{э}} .$$

Откуда при $R_1 // R_2 \gg h_{11\text{э}}$ получаем

$$R_{\text{вх}} = r_{\text{б}} + (1 + h_{21\text{э}})r_{\text{э}} .$$

Выходное сопротивление каскада определяется со стороны выходных зажимов при отключенной нагрузке. Из эквивалентной схемы видно, что

$$R_{\text{вых}} \approx R_{\text{к}} .$$

Сквозной коэффициент усиления при $r_{\text{к}} \rightarrow \infty$

$$K_0^* = -h_{21\text{э}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{(R_{\text{г}} + R_{\text{вх}})(R_{\text{к}} + R_{\text{н}})} .$$

При $R_{\text{г}} \rightarrow 0$ получаем

$$K_0^* = -\frac{h_{21\text{э}} R_{\text{н}\Sigma}}{h_{11\text{э}}} ,$$

где $R_{\text{н}\Sigma} = R_{\text{к}} // R_{\text{н}}$

Сквозной коэффициент усиления по току

$$K_I^* = -h_{21\text{э}} \frac{R_{\text{г}}}{R_{\text{г}} + R_{\text{вх}}} \cdot \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}} .$$

Коэффициент усиления по току пропорционален $h_{21\text{э}}$ транзистора и зависит от значений сопротивлений $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{н}}$.

При выполнении условий $R_{\text{г}} \rightarrow \infty$ и $R_{\text{н}} = 0$ коэффициент усиления по току достигает максимального значения $K_{I.\text{max}}^* = -h_{21\text{э}}$.

Анализ каскада в области нижних частот показывает, что влияние конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 на АЧХ заключается в уменьшении коэффициента усиления на низких частотах (рис. 2.14).

При увеличении емкости конденсаторов полоса пропускания усилителя расширяется в сторону нижних частот. В пределе, если емкости C_1 , C_2 и C_3 увеличиваются вплоть до бесконечности, то АЧХ не имеет завала на нижних частотах (нижняя граничная частота полосы пропускания стремится к нулю).

Переходная характеристика в области больших времен имеет вид спадающей экспоненты (рис. 2.15,б).

Анализ каскада с общим эмиттером в области верхних частот показывает, что коэффициент усиления на высоких частотах уменьшается, а пе-

реходная характеристика в области малых времен имеет вид нарастающей экспоненты (рис. 2.15).

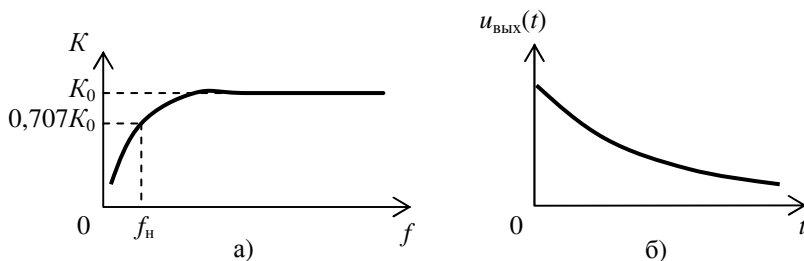


Рис. 2.14 — АЧХ в области нижних частот (а) и переходная характеристика в области больших времен (б) каскада с общим эмиттером

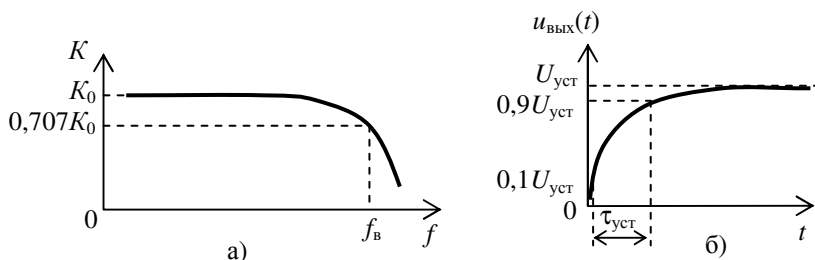


Рис. 2.15 — АЧХ в области верхних частот (а) и переходная характеристика в области малых времен (б) каскада с общим эмиттером

Для увеличения верхней граничной частоты полосы пропускания f_v и уменьшения времени установления $\tau_{\text{уст}}$ необходимо в усилительном каскаде уменьшать паразитные емкости схемы и использовать более высоко-частотные транзисторы с граничной частотой $f_{h21} \gg f_v$.

В каскаде с общим коллектором (эмиттерном повторителе) (рис. 2.16) резисторы $R1$ и $R2$ выполняют функции делителя напряжения в цепи базы и служат для выбора точки покоя каскада. Конденсаторы $C1$ и $C2$ — разделительные конденсаторы на входе и выходе каскада. Емкость этих конденсаторов выбирают таким образом, чтобы их сопротивлением в рабочей полосе частот можно было пренебречь. Резистор R_3 является нагрузкой транзистора по постоянному току. Вместе с резистором R_n он является нагрузкой по переменной составляющей.

Каскад имеет следующие параметры: коэффициент усиления близок к единице (практически лежит в пределах $0,95 \dots 0,99$), коэффициент усиления по току обычно составляет десятки и при $R_n \rightarrow 0$ достигает максимальной величины равной

$$K_{I,\max}^* = h_{21э} + 1 .$$

Выходное сопротивление каскада обычно составляет десятки — сотни ом. Входное сопротивление эмиттерного повторителя наибольшее из всех схем включения транзистора и может достигать сотен килоом.

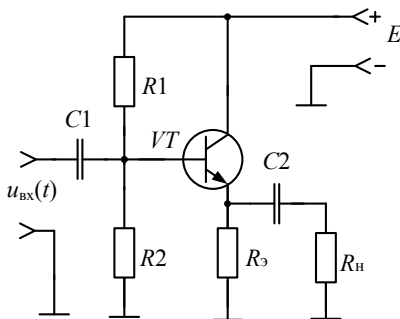


Рис. 2.16 — Каскад с общим коллектором

При достаточно большом сопротивлении делителя напряжения $R1, R2$ входное сопротивление каскада ($R_{вх}$) может быть найдено по формуле

$$R_{вх} = h_{21э} R_{н\Sigma} ,$$

где $R_{н\Sigma} = R_3 // R_{н}$ — сопротивление нагрузки по переменной составляющей.

Схема каскада с общей базой показана на рис. 2.17. Назначение элементов $R1, R2, R_к, C1, C2$ — такое же, как и в каскаде с общим эмиттером. Резистор R_3 обеспечивает путь для протекания постоянной составляющей тока эмиттера, а конденсатор C_6 является блокировочным.

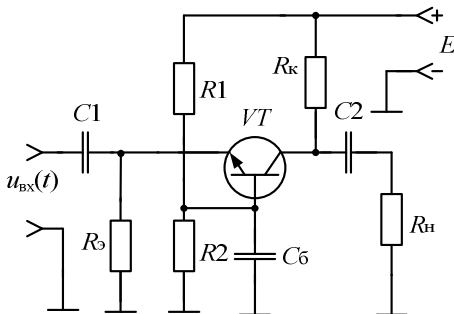


Рис. 2.17 — Каскад с общей базой

Каскад имеет малое входное сопротивление, которое обычно находится в пределах 20...50 Ом. Выходное сопротивление каскада практически равно сопротивлению R_k . Коэффициент усиления по току каскада с общей базой меньше единицы и составляет 0,9...0,95. Коэффициент усиления по напряжению зависит от величины сопротивления нагрузки и при большом сопротивлении нагрузки (порядка единиц — десятков килоом и более) может достигать значительной величины.

Как показывает анализ, если нагрузкой каскада с общей базой является другой такой же каскад с общей базой, то не получается ни усиления по току, ни усиления по напряжению и такое построение многокаскадного усилителя не имеет смысла. На практике каскад с общей базой находит применение в широкополосных усилителях, в которых его нагрузкой является каскад с общим коллектором или общим эмиттером.

В некоторых случаях в усилители вводят цепи коррекции частотных и переходных характеристик. Коррекция частотных и переходных характеристик необходима в широкополосных и импульсных усилителях с целью обеспечения постоянства коэффициента усиления в широкой полосе частот, также в специальных усилителях, предназначенных, например, для коррекции частотных характеристик источника сигнала.

Коррекцию АЧХ специальных усилителей (магнитофонных, микрофонных и т. д.) в рабочей полосе частот обычно осуществляют с помощью частотно зависимой обратной связи.

Обеспечение постоянства коэффициента усиления усилителя в широком частотном диапазоне является сложной задачей. Для оценки усилительных свойств каскада в области высоких частот введено понятие площади усиления

$$Q_S = K_0 f_v ,$$

где Q_S — площадь усиления каскада;

K_0 — коэффициент усиления в области средних частот;

f_v — верхняя граничная частота каскада, измеренная по уровню 3 дБ.

Различают высокочастотную и низкочастотную коррекции. Первая из них обеспечивает компенсацию спада АЧХ в области высоких частот, вторая — в области низких. Высокочастотная коррекция увеличивает площадь усиления каскада.

В зависимости от способа осуществления компенсации спада АЧХ различают коррекцию с использованием частотно зависимых нагрузок и коррекцию с помощью внутри каскадных обратных связей.

На рис. 2.18 и 2.19 показаны примеры схемных построений, реализующих коррекцию, основанную на использовании частотно зависимых нагрузок. Схема рис. 2.18 относится к каскадам с высокочастотной коррекцией, а схема рис. 2.19 — низкочастотной.

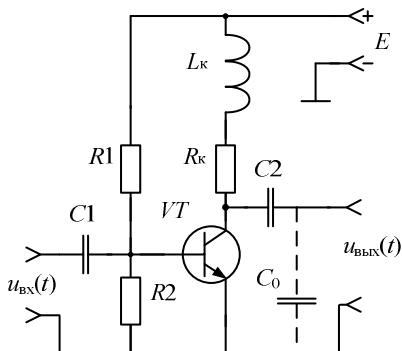


Рис. 2.18 — Усилительный каскад с простой индуктивной высокочастотной коррекцией

В схеме простой индуктивной высокочастотной коррекции (рис. 2.18) нагрузкой каскада является параллельный резонансный контур $R_K L_K C_0$ (C_0 — паразитные емкости выходной цепи). Индуктивность L_K выбирают таким образом, чтобы резонансная частота контура находилась в той области частот, где коэффициент усиления каскада уменьшается из-за ухудшения усилительных свойств транзистора. Вследствие этого сопротивление нагрузки в области высоких частот возрастает, что повышает коэффициент усиления каскада и компенсирует спад усиления за счет ухудшения частотных свойств транзистора. Применение простой индуктивной коррекции позволяет увеличить площадь усиления каскада почти в два раза.

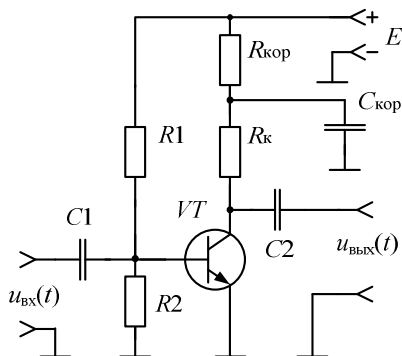


Рис. 2.19 — Усилительный каскад с низкочастотной коррекцией с использованием частотно зависимой нагрузки

В схеме низкочастотной коррекции (рис. 2.19) в области НЧ сопротивление конденсатора $C_{\text{кор}}$ соизмеримо с сопротивлением $R_{\text{кор}}$. В результате этого сопротивление коллекторной цепи увеличивается при уменьшении частоты, что увеличивает коэффициент усиления в низкочастотной области, компенсируя спад АЧХ, вызванный раздельными конденсаторами схемы (осуществляется взаимная коррекция).

Следует отметить, что применение частотно-зависимой нагрузки как элемента коррекции оказывается эффективным только в случае, когда сопротивление нагрузки значительно больше выходного сопротивления корректируемого каскада.

В схеме каскада с эмиттерной высокочастотной коррекцией (рис. 2.20) в цепь эмиттера транзистора введена небольшая емкость $C_{\text{кор}}$, сопротивление которой в области высоких частот становится соизмеримым с сопротивлением резистора $R_{\text{кор}}$. За счет этого глубина ООС в области высоких частот уменьшается, что приводит к увеличению коэффициента усиления, и компенсации его спада за счет ухудшения частотных свойств транзистора.

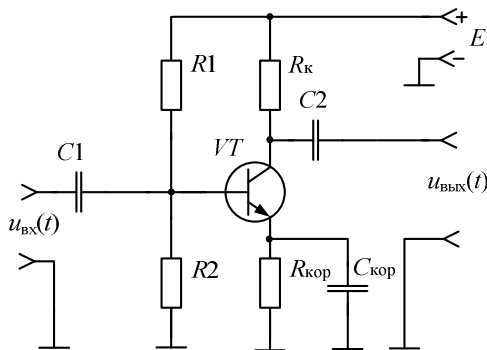


Рис. 2.20 — Каскад с высокочастотной эмиттерной коррекцией

В усилителе с глубокой обратной связью обычно необходимо принимать меры для обеспечения устойчивости. Для оценки устойчивости обычно используют критерий Найквиста, применяемый к устройствам с обратной связью, которые в разомкнутом состоянии устойчивы.

Критерий Найквиста: при замыкании петли обратной связи система будет устойчивой, если годограф вектора $\dot{\vec{K}}^*$, построенный в диапазоне частот от нуля до бесконечности, не охватывает критическую точку $(-1; j0)$.

Запас устойчивости характеризует удаленность устройства от критического состояния. Обычно вводят запас по модулю и аргументу.

О показателях запаса устойчивости можно также судить по АЧХ и ФЧХ устройства с обратной связью. В этом случае модуль коэффициента передачи в петле обратной связи $\dot{\beta}K^*$ должен быть меньше единицы на тех частотах, где фазовый сдвиг достигает значения минус 180° .

Литература по теме: [1, с. 302 — 331]; [2, с. 220 — 245, с. 310 — 313]; [3, с. 188 — 221]; [5, с. 276 — 293]

Контрольные вопросы по теме

43. Поясните особенности анализа работы усилительного каскада в режиме слабых сигналов.

44. Перечислите причины, обуславливающие появление линейных искажений в усилительном каскаде в области НЧ. Как выбрать значение разделительного конденсатора?

45. Перечислите причины обуславливающие появление линейных искажений в усилительном каскаде в области ВЧ.

46. Чему равен коэффициент усиления резисторного каскада в области средних частот на биполярном транзисторе (полевом транзисторе)? Как зависит коэффициент усиления в области средних частот от параметров усилительного элемента и схемы?

47. Нарисуйте принципиальную и эквивалентную схемы каскада с ОЭ. Каково назначение элементов? Пояснить методику составления эквивалентной схемы.

48. Нарисуйте принципиальную и эквивалентную схемы каскада с ОК. Каково назначение элементов. Пояснить методику составления эквивалентной схемы.

49. Нарисуйте принципиальную и эквивалентную схемы каскада с ОБ. Объясните назначение элементов. Поясните методику составления эквивалентной схемы.

50. Чем объяснить уменьшение усиления на НЧ в трансформаторном усилительном каскаде?

51. Чем объяснить уменьшение усиления на ВЧ в трансформаторном усилительном каскаде?

52. Чему равен коэффициент усиления в области средних частот каскада на полевом транзисторе? Как зависит коэффициент усиления в области средних частот от параметров усилительного элемента и других элементов схемы?

53. Объясните, как по известным частотным характеристикам усилительного каскада найти его переходную характеристику.

54. Как изменится на выходе форма прямоугольного импульса, усиленного усилителем переменного тока?

55. Что называется самовозбуждением усилителя? Может ли возникнуть самовозбуждение при отрицательной обратной связи?

56. Какие меры применяют для обеспечения устойчивости усилителя с отрицательной обратной связью?

57. Для какой цели в цепи питания усилительных каскадов многокаскадного усилителя включают цепочки $R_{\phi}C_{\phi}$?

58. Какова причина возникновения паразитной обратной связи в многокаскадных усилителях?

59. Как в многокаскадном усилителе суммируют коэффициенты частотных искажений и фазовые сдвиги, вносимые отдельными каскадами?

60. В каком соотношении должны находиться входное и выходное сопротивления отдельных каскадов многокаскадного усилителя, чтобы получить максимальный сквозной коэффициент усиления?

61. Как влияет коррекция АЧХ на площадь усиления? Приведите примеры. Какими методами можно осуществлять коррекцию АЧХ?

62. Объясните принцип работы простой индуктивной (параллельной) ВЧ коррекции.

63. Объясните принцип работы эмиттерной ВЧ коррекции.

64. Нарисуйте принципиальную и эквивалентную схемы каскада с низкочастотной коррекцией и поясните принцип ее действия.

65. Для каких целей используют ВЧ и НЧ коррекции?

2.5. Дифференциальный усилительный каскад

Дифференциальные усилительные каскады (рис. 2.21) широко распространены в аналоговых радиоэлектронных устройствах и являются основной схемотехники усилителей с непосредственными связями между каскадами.

Дифференциальный усилитель имеет два входа, на которые могут подаваться два напряжения $u_{вх1}(t)$ и $u_{вх2}(t)$, и один выход.

Напряжение на выходе идеального дифференциального каскада линейно зависит от разности входных напряжений

$$u_{вых}(t) = K_{диф}[u_{вх1}(t) - u_{вх2}(t)] = K_{диф} u_{диф}(t),$$

где $u_{диф}(t) = u_{вх1}(t) - u_{вх2}(t)$.

Название «дифференциальный» объясняется тем, что выходное напряжение каскада пропорционально разности входных напряжений. В идеальном дифференциальном каскаде любой сигнал, общий для обоих входов (такой сигнал называется синфазным), подавляется в результате вычитания и не влияет на выходное напряжение.

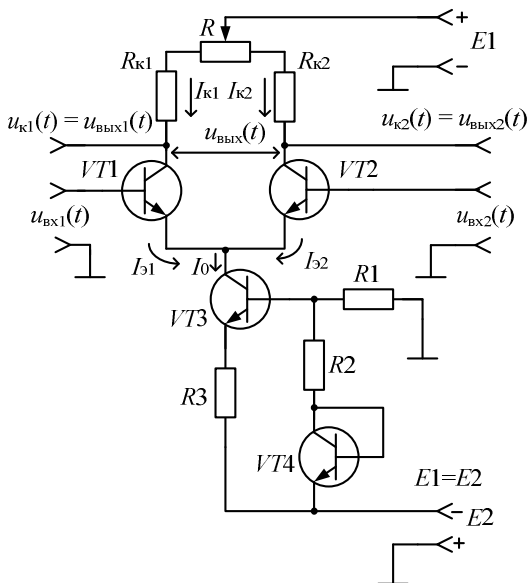


Рис. 2.21 — Дифференциальный каскад

Однако этот идеальный случай не может быть достигнут на практике, так как в реальных схемах транзисторы $VT1$ и $VT2$ не являются полностью идентичными. Вследствие этого напряжение на выходе реального усилителя всегда будет в некоторой степени зависеть от синфазного напряжения на входе каскада и входного дифференциального напряжения в соответствии с выражением

$$u_{\text{вых}}(t) = K_{\text{диф}} u_{\text{диф}}(t) + K_{\text{синф}} u_{\text{синф}}(t) ,$$

где $K_{\text{синф}} \ll 1$ — коэффициент передачи синфазного напряжения;

$u_{\text{синф}}(t) = (u_{\text{ВХ1}}(t) + u_{\text{ВХ2}}(t)) / 2$ — среднее значение двух входных сигналов.

Качество дифференциального каскада характеризуют коэффициентом подавления синфазного сигнала

$$K_{\Pi} = \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{синф}}} .$$

Коэффициент подавления K_{Π} показывает способность каскада различать малый дифференциальный сигнал на фоне большого синфазного напряжения. Как правило, его оценивают в логарифмических единицах.

$$K_{\Pi}(\text{дБ}) = 20 \lg K_{\Pi} .$$

Очевидно, чем больше K_{π} , тем ближе реальный дифференциальный каскад к идеальному, у которого $K_{\text{сиф}} = 0$. В современных дифференциальных каскадах величина K_{π} может составлять от 60 до 100 дБ.

Распространенным типом синфазного сигнала являются различные помехи и наводки, действующие одновременно на оба входа дифференциального усилителя. Поэтому вопрос увеличения K_{π} есть одновременно вопрос повышения помехоустойчивости дифференциального каскада.

Схема, показанная на рис. 2.21, является наиболее распространенной. По этой схеме построены каскады, выпускаемые в виде отдельных микросхем (например, 118УД1, 122УД1). Она также используется во входных каскадах многих интегральных операционных усилителей.

Дифференциальный каскад содержит два параллельно включенных однотактных усилительных каскада на транзисторах $VT1$ и $VT2$, в общую эмиттерную цепь которых включен источник постоянного тока на транзисторе $VT3$. Дифференциальный каскад симметричен. Симметрия обеспечивается использованием одинаковых транзисторов $VT1$, $VT2$ и резисторов $R_{K1} = R_{K2}$. Если симметрия нарушается вследствие разброса параметров элементов схемы, то с помощью переменного резистора R восстанавливают симметрию (балансируют схему).

Дифференциальный каскад допускает подачу входных сигналов от двух источников (рис. 2.22, а) или от одного источника входного сигнала (рис. 2.22 б,в).

Выходное напряжение снимают либо между коллекторами транзисторов (симметричный дифференциальный выход) (см. рис. 2.21), либо между одним из коллекторов и общим проводом (несимметричный выход $u_{K1}(t) = u_{\text{вых1}}(t)$ или $u_{K2}(t) = u_{\text{вых2}}(t)$).

При $u_{\text{вх}}(t) = 0$ ток источника тока I_0 делится поровну между двумя транзисторами, т. е.

$$I_{\text{э1}} = I_{\text{э2}} = \frac{I_0}{2}.$$

Равенству эмиттерных токов транзисторов соответствует равенство их коллекторных токов

$$I_{K1} = I_{K2} = h_{21Б} \frac{I_0}{2} \approx \frac{I_0}{2},$$

и напряжений на коллекторах

$$U_{K1} = U_{K2} \approx E_1 - \frac{I_0 R_K}{2},$$

где $R_K = R_{K1} = R_{K2}$; $h_{21Б} \approx 1$ — коэффициент передачи по току при включении с общей базой. Отсюда следует, что при $u_{\text{вх}}(t) = 0$ напряжение на симметричном дифференциальном выходе будет равно нулю

$$U_{\text{вых}} = U_{K1} - U_{K2} = 0.$$

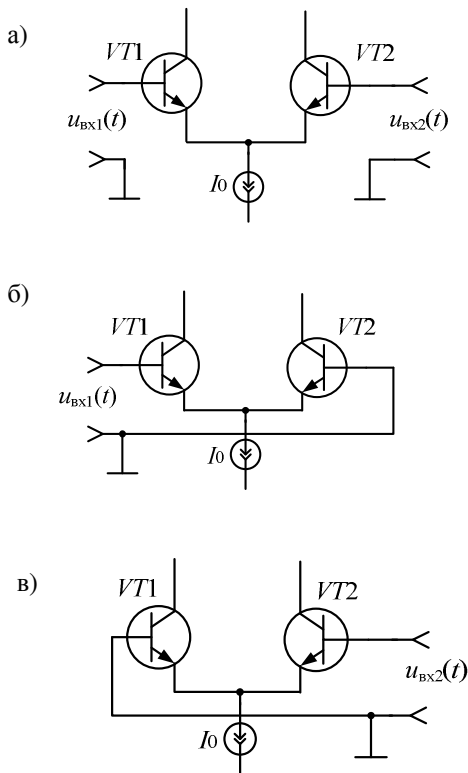


Рис. 2.22 — Схемы подачи сигналов на входы дифференциального каскада

Данное состояние схемы характеризует режим баланса каскада или режим покоя.

Рассмотрим работу схемы (рис. 2.23) при наличии входного дифференциального сигнала, например, при подаче его на вход транзистора $VT1$ ($u_{BX1}(t)$). Предположим, что напряжение входного сигнала имеет положительную полярность.

Под воздействием входного сигнала через входные цепи обоих транзисторов будет протекать входной ток $i_{BX}(t)$, увеличивающий ток базы транзистора $VT1$ и уменьшающий ток базы транзистора $VT2$. При этом токи $i_{31}(t)$ и $i_{K1}(t)$ увеличиваются, а токи $i_{32}(t)$ и $i_{K2}(t)$ уменьшаются. Изменение токов обоих транзисторов происходит на одну и ту же величину. При этом сумма токов $i_{31}(t) + i_{32}(t) = I_0$ остается неизменной.

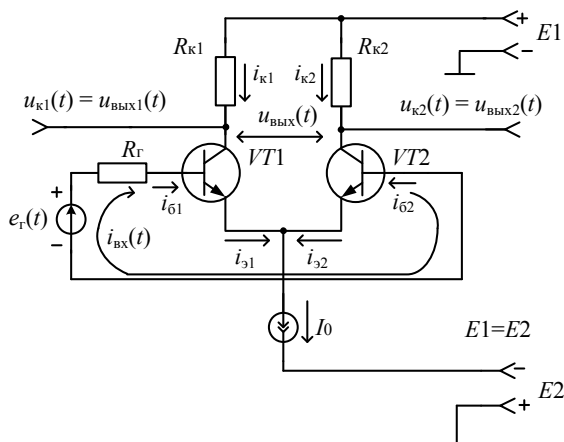


Рис. 2.23 — Токи в каскаде при подаче дифференциального сигнала

Изменения коллекторных токов вызывают изменение напряжений на коллекторах. Напряжение $u_{к1}(t) = E_1 - i_{к1}(t)R_k$ — уменьшается, что вызывает приращение напряжения на коллекторе транзистора VT1 противоположное по знаку (проинвертированное) по отношению к приращению напряжения на входе ($u_{вх1}(t)$) (см. рис. 2.24).

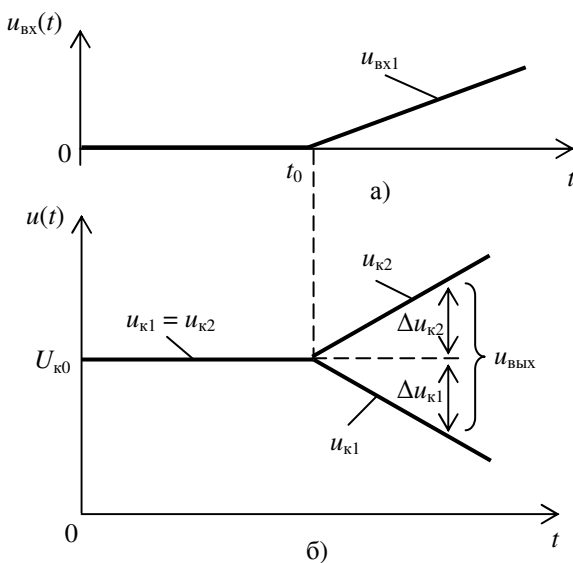


Рис. 2.24 — Потенциальные диаграммы дифференциального каскада при подаче сигнала на вход транзистора VT1

Напряжение $u_{к2}(t) = E_1 - i_{к2}(t)R_k$ — возрастает. Это создает соответственно приращение напряжения на коллекторе транзистора $VT2$ того же знака (непроинвертированное по знаку) по отношению к приращению напряжения на входе ($u_{вх2}$).

Таким образом, при подаче сигнала на базу транзистора $VT1$ ($u_{вх1}$), выход каскада со стороны коллектора этого транзистора ($u_{к1}$) является инвертирующим, а со стороны коллектора транзистора $VT2$ ($u_{к2}$) — неинвертирующим.

Сигнал, снимаемый между коллекторами транзисторов $VT1$ и $VT2$, будет равен удвоенному значению приращения каждого из коллекторных напряжений

$$u_{вых} = u_{к2} - u_{к1} = 2\Delta u_k.$$

Коэффициент усиления дифференциального каскада по обоим несимметричным выходам ($u_{вых1}$ и $u_{вых2}$) при $R_n \rightarrow \infty$ может быть найден по формуле

$$K_{1,2}^* = \frac{h_{21э} R_k}{R_\Gamma + 2h_{1э}}.$$

Коэффициент усиления по симметричному дифференциальному выходу будет в два раза больше и при $R_\Gamma = 0$ он равен

$$K^* = \frac{h_{21э} R_k}{h_{1э}}.$$

Рассмотрим работу схемы при синфазном сигнале на входе.

Пусть потенциалы баз транзисторов $VT1$ и $VT2$ стали одновременно более положительными. В этом случае оба транзистора стремятся открыться сильнее, т.е. коллекторные токи обоих транзисторов стремятся увеличиться. Но так как сумма эмиттерных токов транзисторов равна постоянной величине (задаваемой источником неизменного тока $I_Э$), то ни один из коллекторных токов не увеличивается и напряжение на выходе остается практически неизменным.

Для увеличения коэффициента усиления дифференциального каскада вместо резистора R_k часто используют динамическую нагрузку, функцию которой выполняет источник неизменного тока на транзисторе (рис. 2.25). Подобные схемы позволяют получить коэффициент усиления дифференциального сигнала существенно больший, чем в схеме с резисторной нагрузкой.

Схема, собранная на транзисторах $VT3, VT4$ носит название «токовое зеркало». Она характеризуется тем, что при использовании транзисторов, имеющих одинаковые параметры, ток $I_{к4}$ с высокой степенью точности ра-

вен тока I_{K3} . При изменении тока I_{K3} ток I_{K4} изменяется на такую же величину.

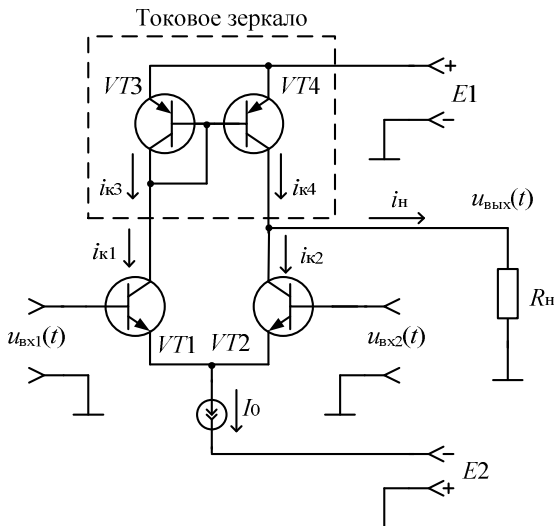


Рис. 2.25 — Дифференциальный каскад с динамической нагрузкой

Транзисторы $VT1$ и $VT2$ образуют дифференциальный каскад.

При отсутствии сигнала на входе ($u_{\text{вх}1}(t) = u_{\text{вх}2}(t) = 0$) схема находится в режиме покоя (баланса). Токи $i_{K1} = i_{K2} = i_{K3} = i_{K4} = I_0 / 2$.

Ток, протекающий через нагрузку,

$$i_{\text{н}} = i_{K4} - i_{K2} = 0.$$

Следовательно, выходное напряжение равно нулю.

Предположим, что на входе под действием сигнала протекает входной ток $i_{\text{вх}}(t)$, который увеличивает ток $i_{K1}(t)$ и уменьшает ток $i_{K2}(t)$. Изменение базовых токов вызывает изменение коллекторных токов транзисторов:

$$i_{K1}(t) = I_0 / 2 + h_{21\beta} i_{\text{вх}}(t);$$

$$i_{K2}(t) = I_0 / 2 - h_{21\beta} i_{\text{вх}}(t).$$

Так как ток $i_{K4}(t)$ равен току $i_{K1}(t)$ (на основании свойства токового зеркала), то

$$i_{K4}(t) = I_0 / 2 + h_{21\beta} i_{\text{вх}}(t).$$

При этом ток, протекающий через нагрузку, равен

$$i_{\text{н}}(t) = i_{\text{к4}}(t) - i_{\text{к2}}(t) = 2h_{21\text{э}} i_{\text{вх}}(t) .$$

Напряжение на выходе схемы

$$u_{\text{вых}}(t) = 2h_{21\text{э}} i_{\text{вх}}(t) R_{\text{н}} .$$

Коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K = \frac{2h_{21\text{э}} R_{\text{н}}}{R_{\text{г}} + 2h_{11\text{э}}} ,$$

где $R_{\text{г}}$ — сопротивление источника сигнала.

В многокаскадных усилителях сопротивление $R_{\text{н}}$ является входным сопротивлением следующего каскада, величина которого с помощью средств современной схемотехники может быть обеспечена порядка нескольких сотен килоом. В связи с этим коэффициент усиления каскада с динамической нагрузкой может составлять несколько сотен.

Литература по теме: [1, с.140 — 246]; [5, с.140 — 214]; [6, с. 317 — 410].

Контрольные вопросы по теме

66. Поясните особенности подачи напряжения на входы дифференциального каскада.

67. Что называется коэффициентом подавления? Что характеризует коэффициент подавления?

68. Как зависит напряжение на выходе дифференциального каскада от синфазного и дифференциального напряжений на входе?

69. Объясните работу дифференциального каскада при поступлении на его вход дифференциального сигнала.

70. Объясните работу дифференциального каскада при поступлении на его вход синфазного сигнала.

71. Как изменится коэффициент усиления дифференциального усилителя при увеличении тока источника тока?

72. Нарисуйте потенциальную диаграмму при подаче напряжения на вход транзистора VT1 (на вход транзистора VT2).

73. Поясните работу дифференциального каскада с динамической нагрузкой.

74. Каковы достоинства дифференциального каскада с динамической нагрузкой?

75. Поясните области применения дифференциальных каскадов.

2.6. Мощные усилительные каскады

Усилитель мощности — предназначен для обеспечения заданной мощности полезного сигнала в цепи нагрузки. Усилитель мощности обычно является оконечным каскадом многих радиотехнических устройств.

Напряжения и токи, действующие в цепях усилителя мощности, значительно превосходят напряжения и токи, действующие в усилителях напряжения. Если в маломощный усилителях (каскадах предварительного усиления) обычно используется небольшой линейный участок проходной характеристики активного элемента, то в усилителях мощности стремятся наиболее полно использовать всю характеристику, включая ее нелинейные участки, что приводит к заметному возрастанию нелинейных искажений. Поэтому оконечные каскады обычно рассчитываются графически по входным и выходным характеристикам транзисторов или ламп. Для усилителей мощности первостепенное значение приобретают такие параметры, как величина отдаваемой в нагрузку мощности, коэффициент нелинейных искажений и коэффициент полезного действия.

В усилителях мощности обычно используются режимы B или AB , обеспечивающие более высокий КПД, по сравнению с режимом A .

В ламповых усилителях оконечный каскад обычно содержит мощный выходной трансформатор, основное назначение которого состоит в согласовании низкоомного сопротивления нагрузки (динамической головки) с высокоомным выходным сопротивлением ламп оконечного каскада, что позволяет увеличить мощность, отдаваемую в нагрузку.

Современные бестрансформаторные усилители выполняют на транзисторах или интегральных микросхемах. Особенности их построения заключаются в следующем:

- 1) необходимость термостабилизации тока покоя транзисторов оконечного каскада для предотвращения теплового пробоя;
- 2) необходимость стабилизации напряжения на транзисторах оконечного каскада (стабилизация напряжения в средней точке двухтактного каскада) для предотвращения ограничения сигнала на выходе;
- 3) защита транзисторов оконечного каскада от короткого замыкания нагрузки;
- 4) подбор (в отдельных случаях) транзисторов с близкими характеристиками;
- 5) использование (в ряде случаев) двухполярного источника питания (два источника питания разной полярности с заземленной средней точкой).

В настоящее время известно много способов решения перечисленных задач. Они основаны на вводе в бестрансформаторные транзисторные усилители цепей стабилизации и защиты.

Перечисленные достоинства двухтактного каскада в полной мере реализуются при полной симметрии плеч. Вследствие разброса характеристик и параметров транзисторов полной симметрии достичь не удастся.

Основные схемы двухтактных бестрансформаторных оконечных каскадов усилителей мощности показаны на рис. 2.26.

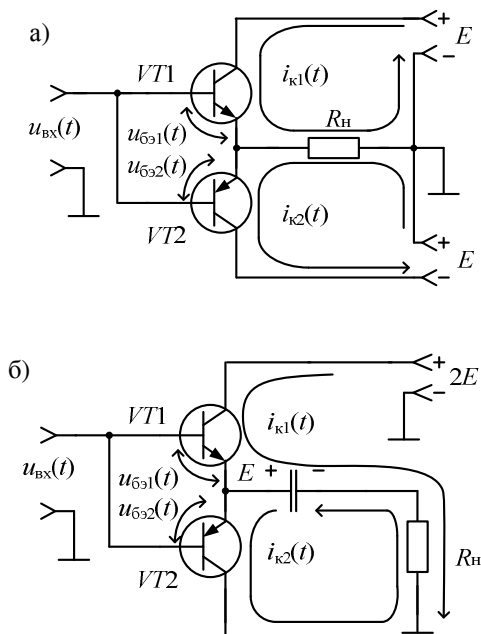


Рис. 2.26 — Двухтактные оконечные каскады на комплиментарных транзисторах: а) с двумя источниками питания; б) с одним источником питания

На рис. 2.26 изображены оконечные каскады на комплиментарных парах транзисторов. Комплиментарными называют транзисторы, имеющие разные типы проводимости ($n-p-n$ и $p-n-p$) и одинаковые параметры. Напряжение $U_{\text{бэ}}$ транзисторов при отсутствии сигнала равно нулю, транзисторы закрыты и ток через них не течет. Транзисторы работают в режиме B и включены по схеме с общим коллектором.

При использовании в схеме двух источников питания (рис. 2.26, а) нагрузка включается между точкой соединения эмиттеров транзисторов и средней точкой источников питания. Разделительный конденсатор на выходе в этой схеме не нужен.

При поступлении на вход схемы (рис. 2.26, а) синусоидального сигнала транзисторы $VT1$ и $VT2$ открываются поочередно. Транзистор $VT1$ открывается при положительной полуволне на входе. Ток $i_{k1}(t)$ протекает от верхнего по схеме источника питания через транзистор $VT1$ и сопротивление нагрузки R_n . При поступлении на вход отрицательной полуволны открывается транзистор $VT2$. Ток $i_{k2}(t)$ протекает от нижнего по схеме источника питания через сопротивление нагрузки и транзистор $VT2$. Видно, что токи $i_{k1}(t)$ и $i_{k2}(t)$ протекают через сопротивление нагрузки в противоположных направлениях. Этим обеспечивается формирование положительной и отрицательной полуволн тока в нагрузке.

На рис. 2.26,б изображена схема оконечного каскада с одним источником питания. Для нормальной работы такой схемы на выходе схемы включен разделительный конденсатор C , который заряжен до напряжения, равного половине напряжения источника питания. Потенциал точки соединения эмиттеров транзисторов относительно общего провода в отсутствии сигнала равен E . В этой схеме для получения таких же выходных токов, как и в предыдущей схеме, напряжение источника питания должно быть равно $2E$ (в предыдущей схеме два источника питания с напряжением E).

При поступлении на вход синусоидального сигнала транзисторы $VT1$ и $VT2$ открываются поочередно. Транзистор $VT1$ открывается при положительной полуволне на входе. Ток $i_{k1}(t)$ протекает от источника питания через транзистор $VT1$, заряженный конденсатор C и сопротивление нагрузки. При отрицательной полуволне входного сигнала открывается транзистор $VT2$. В этом случае источником энергии, обеспечивающим протекание выходного тока, является заряженный конденсатор C . Ток $i_{k2}(t)$ протекает от заряженного положительно вывода конденсатора C через транзистор $VT2$ и сопротивление нагрузки к отрицательно заряженному выводу. Видно, что токи $i_{k1}(t)$ и $i_{k2}(t)$ протекают через сопротивление нагрузки в противоположных направлениях (положительная и отрицательная полуволны).

Достоинства двухтактных каскадов.

1) Компенсация четных гармоник. Четные гармоники, входящие в состав токов плеч каскада, изменяются синфазно и в нагрузке взаимно уничтожаются. За счет компенсации четных гармоник в двухтактных каскадах можно использовать экономичный режим B .

2) Относительно небольшая чувствительность к пульсациям питающего напряжения. При пульсациях напряжения источника питания токи покоя обоих плеч изменяются одинаково, поэтому их разность продолжает оставаться равной нулю. Практически в двухтактном каскаде обычно допускаются пульсации питающего напряжения примерно в 5 раз большие, чем в одноктактном.

3) В трансформаторных каскадах кроме этого также отсутствует постоянное намагничивание сердечника выходного трансформатора и отсутствует ток основной частоты в цепи источника питания.

При анализе двухтактных оконечных каскадов широко используют принцип совмещения проходных динамических характеристик транзисторов, образующих двухтактную схему (рис. 2.27).

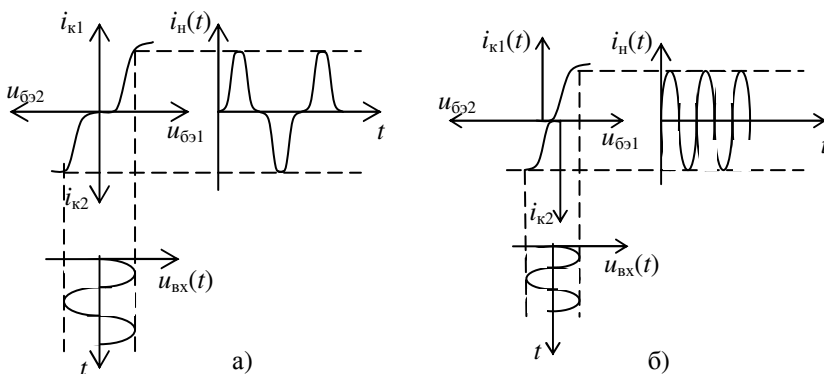


Рис. 2.27 — Диаграммы работы двухтактных каскадов в режиме B (а) и режиме AB (б)

При отсутствии смещения между базами транзисторов их проходные характеристики совмещают так, что нулевые значения осей координат совпадают, и одноименные оси координат направлены в противоположные стороны (см. рис. 2.27, а).

Реальная совмещенная проходная динамическая характеристика имеет нелинейные участки, при малых и больших коллекторных токах (рис. 2.27). Если транзисторы работают без смещения в режиме B , то из-за нелинейности их характеристик в области малых сигналов выходной ток в нагрузку будет искажен (см. рис. 2.27, а). Такие искажения называют искажениями типа «ступенька».

Для устранения искажений типа «ступенька» на базы транзисторов необходимо подать небольшое отпирающее напряжение смещения, т. е. перейти от режима B к режиму AB . Этот случай иллюстрируется диаграммами на рис. 2.27, б.

Нагрузочной характеристикой оконечного каскада называют зависимость мощности, выделяемой в сопротивлении нагрузки от величины этого сопротивления. Как следует из известного соотношения

$$P_H = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_H} = I_{\text{вых}}^2 R_H ,$$

при $R_H \rightarrow \infty$ и $R_H = 0$ выходная мощность равна нулю.

Зависимость выходной мощности, выделяемой в нагрузке от величины сопротивления нагрузки, изображена на рис. 2.28.

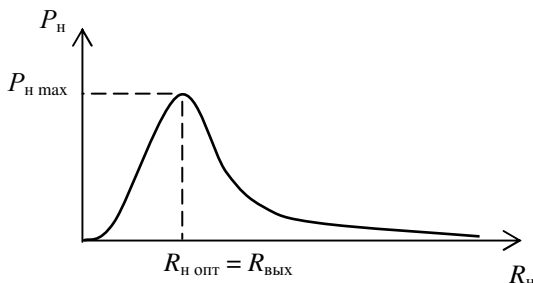


Рис. 2.28 — Нагрузочная характеристика оконечного каскада

Видно, что при некотором $R_{H \text{ опт}}$ мощность, выделяемая в нагрузке, будет максимальной. Условие получения максимальной мощности в нагрузке называется условием согласования по мощности. Анализ показывает, что максимальная мощность будет выделяться при равенстве выходного сопротивления каскада сопротивлению нагрузки

$$R_{\text{вых}} = R_{H \text{ опт}} .$$

В каскадах мощного усиления, работающих в режиме В, мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, зависит от величины входного напряжения (коэффициента использования по напряжению). Эта мощность может быть рассчитана по формуле

$$P_k = \frac{E^2}{R_H} \left(\frac{1}{\pi} \xi - \frac{1}{4} \xi^2 \right) ,$$

где P_k — мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора;

$\xi = \frac{U_m}{E}$ — коэффициент использования по напряжению.

Выделяемая на коллекторе транзистора мощность нагревает его. Температура коллекторного перехода транзистора может быть найдена из соотношения

$$T_{\Pi} = P_k R_{\text{ПС}} - T_c .$$

где T_{Π} — температура коллекторного перехода;

T_c — температура окружающей среды;

R_{nc} — тепловое сопротивление переход—окружающая среда.

Литература по теме: [1, с. 250 — 298]; [2, с. 122 — 162]; [3, с. 221 — 240]; [5, с. 233 — 292].

Контрольные вопросы по теме

76. Области использования основных режимов работы усилительного каскада.

77. Как с помощью динамических характеристик найти полезную (отдаваемую в нагрузку) мощность, мощность, потребляемую от источника питания, коэффициенты усиления по току и напряжению?

78. Что такое коэффициент использования напряжения, от чего он зависит и в каких пределах может изменяться?

79. Чему равен максимальный КПД коллекторной цепи в режиме *A* и *B* без учета нелинейности характеристик?

80. Как зависят тепловые потери на коллекторе транзистора от амплитуды напряжения на выходе усилителя (от коэффициента использования по напряжению) при работе в режиме *B*?

81. Нарисуйте схему двухтактного усилителя и поясните его работу.

82. В чем основные преимущества двухтактного усилителя по сравнению с однотактным?

83. Почему в двухтактном каскаде снижаются нелинейные искажения по сравнению с однотактным в том же режиме?

84. Что такое выходная динамическая характеристика по постоянному и переменному току? Как строятся эти характеристики.

85. Чем объяснить причину спада частотной характеристики трансформаторного каскада в области высших и низших частот?

86. При каком условии в нагрузку усилительного каскада передается максимальная мощность ?

87. Перечислите основные методы снижения нелинейных искажений усилителей мощности

2.7. Усилители постоянного тока

Коэффициент усиления усилителя постоянного тока (УПТ) при $f = 0$ равен номинальному значению K_0 . Амплитудно-частотная характеристика УПТ изображена на рис. 2.29. Видно, что в области нижних частот у УПТ отсутствует завал частотной характеристики. В области верхних частот амплитудно-частотная характеристика УПТ и его эквивалентная схема совпадают со схемой резистивного каскада. Уменьшение коэффициента в этой области частот обусловлено теми же причинами, что и в обычном резистивном каскаде.

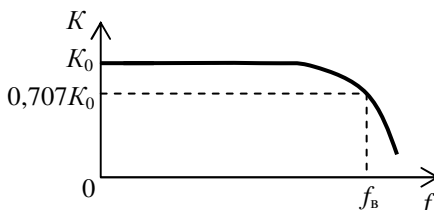


Рис. 2.29 — АЧХ усилителя постоянного тока

В усилителях постоянного тока отсутствуют разделительные конденсаторы, конденсаторы в цепи эмиттера и трансформаторы.

При разработке УПТ приходится решать две основные проблемы: согласование потенциалов на входе и выходе схемы и уменьшение нестабильности (дрейфа) выходного напряжения или выходного тока в отсутствии сигнала на входе.

Если при отсутствии источника сигнала на входе УПТ, а также при включении на входе источника сигнала с $u_{вх}(t) = 0$ напряжение на выходе УПТ остается неизменным, то говорят, что потенциалы на входе согласованы.

Для согласования потенциальных уровней на входе используют два источника питания, а потенциал базы входного транзистора в точке покоя устанавливают равным нулю (см. рис. 2.30).

Если при подаче на вход УПТ нулевого потенциала относительно общего провода потенциал выхода УПТ относительно общего провода также равен нулю, то говорят, что потенциалы на выходе согласованы.

Согласование потенциалов на выходе УПТ осуществляется обычно с помощью схемы сдвига уровня.

Основными причинами дрейфа нуля являются: температурная нестабильность параметров транзисторов, изменение питающих напряжений, постепенное изменение параметров активных и пассивных элементов вызванное их старением и др.

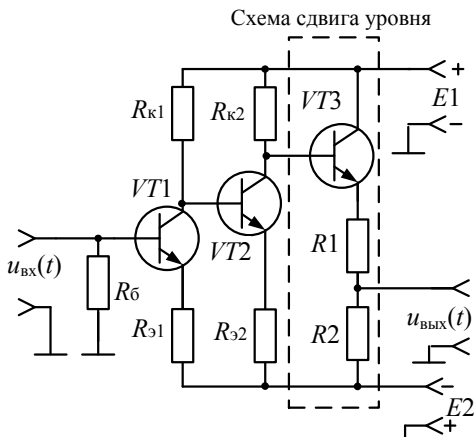


Рис. 2.30 — Двухкаскадный усилитель постоянного тока со схемой сдвига уровня

Дрейф первого каскада усиливается всеми последующими каскадами и составляет основную долю полного дрейфа на выходе усилителя. Поэтому основное внимание уделяют уменьшению дрейфа первых каскадов.

Схемные методы уменьшения дрейфа нуля:

- использование мостовых схем;
- использование в цепях, определяющих режим работы каскада, источников неизменного тока;
- использование УПТ с преобразованием сигнала;
- использование УПТ с периодической коррекцией выходного напряжения.

К мостовым схемам относятся последовательно и параллельно балансные каскады, дифференциальные каскады.

Полевые транзисторы обладают значительно меньшей зависимостью параметров от температуры, следовательно, и меньшим дрейфом. Но полевые транзисторы обеспечивают меньшее усиление, чем биполярные. Это приводит к тому, что в дрейфе нуля выходного уровня начинает заметно сказываться составляющая, обусловленная нестабильностью последующего каскада, увеличивая этим полный дрейф.

В усилителе с преобразованием сигнала для борьбы с дрейфом входной низкочастотный сигнал предварительно модулирует сигнал высокой частоты. Модулированный сигнал усиливается усилителем переменного тока, который не обладает дрейфом нуля, затем усиленный сигнал демодулируют. По принципу модулятор-демодулятор построена интегральная микросхема К140УД13.

Литература по теме: [2; с. 268 — 278]; [3, с. 267 — 274]; [5, с. 294 — 320].

Контрольные вопросы по теме

88. Каковы причины дрейфа нуля? Методы снижения дрейфа нуля.
89. Приведите принципиальную и эквивалентную схемы УПТ.
90. Нарисуйте типичные амплитудную, частотную и фазовую характеристики УПТ.
91. Укажите особенности обеспечения стабильности работы многокаскадных УПТ.
92. Почему дрейф нуля в усилителях переменного тока значительно меньше, чем в УПТ?
93. Какие вы знаете схемные методы уменьшения дрейфа нуля?
94. Какие вы знаете конструктивные методы уменьшения дрейфа нуля?
95. Каково назначение схемы сдвига уровня?
96. Как осуществляется согласование потенциалов на входе УПТ?
97. Поясните особенности схемного тока.

2.8. Операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и несимметричным выходом, имеющий весьма высокие коэффициенты усиления и входное сопротивление. В аналоговой вычислительной аппаратуре эти усилители используют для проведения различных математических операций (отсюда термин «операционный усилитель»).

Идеальный операционный усилитель имеет следующие свойства: коэффициент усиления в бесконечно широкой полосе частот бесконечно велик, входное сопротивление бесконечно велико, а выходное — близко к нулю. Как правило, в современных ОУ удастся получить за счет других одну из характеристик ОУ, близкую к идеальной.

Состояние, когда при входном напряжении равном нулю, выходное напряжение ($\Delta U_{\text{вых}}$) также равно нулю, называется балансом ОУ. Однако в реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется, т. е. наблюдается разбаланс.

Входным напряжением смещения нуля $U_{\text{вх.см}}$ называют напряжение, которое необходимо подать на вход ОУ для создания баланса. Напряжения $U_{\text{вх.см}}$ и $\Delta U_{\text{вых}}$ связаны соотношением

$$U_{\text{вх.см}} = \Delta U_{\text{вых}} / K,$$

где $U_{\text{вх.см}}$ — входное напряжение смещения нуля;

$\Delta U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе ОУ, обусловленное разбалансом;

K — коэффициент усиления операционного усилителя.

Основными причинами разбаланса ОУ являются:

1) существующий разброс параметров элементов операционного усилителя;

2) зависимость от температуры параметров ОУ, которая вызывает температурный дрейф входного напряжения смещения нуля и температурный дрейф выходного напряжения.

Обычно балансировку осуществляют с помощью внешних цепей, подключаемых к специальным выводам ОУ.

Структурная схема устройства типичного операционного усилителя изображена на рис. 2.31.

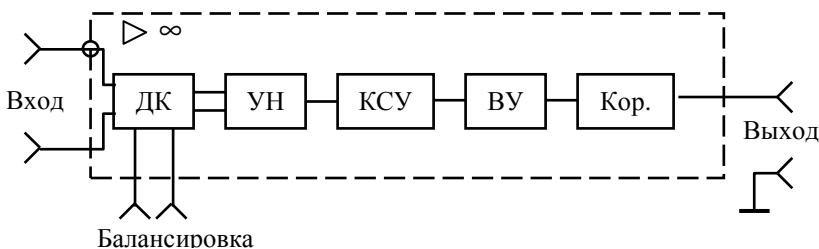


Рис. 2.31 — Структурная схема типичного ОУ

На входе ОУ включен дифференциальный каскад (ДК). Вход ОУ, обозначенный кружком, называют инвертирующим, другой вход — неинвертирующим. При подаче сигнала на неинвертирующий вход выходной сигнал будет синфазен с входным. В этом случае усилитель называют неинвертирующим. При подаче сигнала на инвертирующий вход выходной сигнал будет в противофазе с входным и усилитель называют в этом случае инвертирующим. Дифференциальный каскад обычно имеет внешние выводы для осуществления балансировки ОУ.

Усилитель напряжения (УН) предназначен для основного усиления сигнала. В нем обычно принимаются все меры для получения максимального коэффициента усиления.

Каскад сдвига уровня (КСУ) предназначен для сдвига уровня постоянного выходного напряжения таким образом, чтобы при подаче на вход нулевого напряжения ($u_{\text{вх}}(t) = 0$) выходное напряжение также было бы равно нулю ($u_{\text{вых}}(t) = 0$).

Выходной усилитель (ВУ) — это обычно двухтактный каскад на комплементарных транзисторах, работающий в режиме *AB*.

Корректирующая цепь (Кор) может быть включена либо в усилителе напряжения (УН), либо на входе или выходе выходного усилителя и предназначена для устранения возможности возникновения паразитной генерации в ОУ на высоких частотах (самовозбуждения ОУ).

Параметры ОУ без внешних обратных связей в зависимости от типа усилителя могут быть весьма различны. Современные ОУ имеют следующие параметры:

- коэффициент усиления K_{oy} не менее 50×10^3 ;
- входное сопротивление $R_{вх\ оу}$ не менее 5×10^3 Ом;
- выходное сопротивление $R_{вых\ оу}$ не более 200 Ом.

Скорость нарастания выходного напряжения ОУ — это скорость изменения выходного напряжения при скачкообразном изменении входного напряжения. Обычно она имеет размерность Вольт/микросекунду. Паспортные значения скорости нарастания у большинства ОУ обычно находятся в пределах от 0,1 до 100 В/мкс.

Обычно ОУ охватывают отрицательной обратной связью, которая заводится с выхода ОУ на его инвертирующий вход. При этом параметры полученного усилителя определяется в основном параметрами внешней цепи обратной связи и не зависят от параметров собственно операционного усилителя. Это позволяет сделать параметры такого усилителя с обратной связью высокостабильными.

Типичные АЧХ нескорректированного и скорректированного операционных усилителей изображены на рис. 2.32.

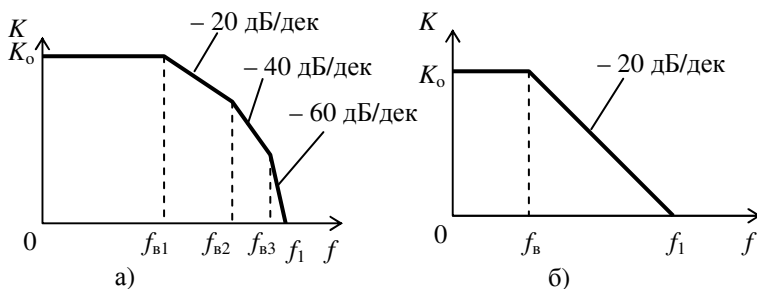


Рис. 2.32 — Типичные АЧХ операционного усилителя;
а) нескорректированного; б) скорректированного

Амплитудно-частотная характеристика ОУ зависит из АЧХ отдельных каскадов (см. рис. 2.31). Постоянство коэффициента усиления обеспечивается лишь до некоторой частоты, выше которой начинается срез, оп-

ределяемый частотными свойствами каскадов ОУ. Крутизна наклона АЧХ нескорректированного ОУ последовательно увеличивается после каждой частоты f_{vi} на -20 дБ/дек (-6 дБ/окт.), где f_{vi} — верхняя граничная частота i -го каскада, входящего в операционный усилитель. Введение коррекции позволяет сделать наклон АЧХ постоянным, равным -20 дБ/дек. Это достигается за счет уменьшения полосы пропускания в области верхних частот.

Амплитудно-частотная характеристика ОУ с обратной связью зависит от глубины обратной связи. При изменении глубины обратной связи изменяется полоса пропускания и коэффициент усиления ОУ. При уменьшении в некоторое число раз коэффициента усиления (K_0) полоса пропускания (f_a) увеличивается во столько же раз. При этом произведение K_0 на f_a остается постоянным

$$K_0 f_a = f_1,$$

где f_1 носит название частоты единичного усиления.

Для каждого конкретного типа ОУ частота единичного усиления f_1 остается величиной постоянной и приводится в справочных данных на микросхему.

Для предотвращения возбуждения усилителя на высоких частотах в некоторых типах усилителей требуется включать корректирующие конденсаторы для создания цепи частотно-зависимой отрицательной обратной связи, уменьшающей усиление на высоких частотах, превышающих рабочую полосу частот.

В большинстве современных интегральных усилителей не удается при больших коэффициентах усиления ($K > 100$) получить верхнюю граничную частоту полосы пропускания более 100 кГц. Это затрудняет использование ОУ в широкополосных усилителях. Однако в УНЧ применение ОУ возможно и целесообразно.

Литература по теме: [4; с. 25 — 140]; [7, с. 197 — 244].

Контрольные вопросы по теме

98. Дайте определение ОУ. Каковы свойства идеального ОУ?
99. В чем заключается балансировка операционного усилителя?
100. Перечислите основные каскады ОУ?
101. Каково назначение каскада сдвига уровня?
102. Поясните назначение высокочастотной коррекции, используемой в ОУ?
103. Поясните вид амплитудно-частотной характеристики нескорректированного ОУ.

104. Как изменится вид АЧХ ОУ при увеличении глубины обратной связи?
105. Что называется входным напряжением смещения нуля?
106. Что называется частотой единичного усиления?
107. Какими характеристиками обладают современные ОУ?

2.9. Устройства аналоговой обработки сигналов на операционных усилителях

Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей с внешней обратной связью показаны на рис. 2.33 и 2.34 соответственно.

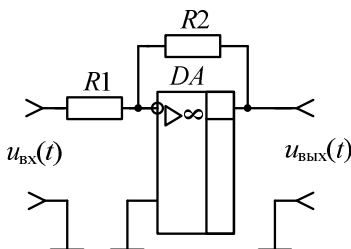


Рис. 2.33 — Инвертирующий усилитель

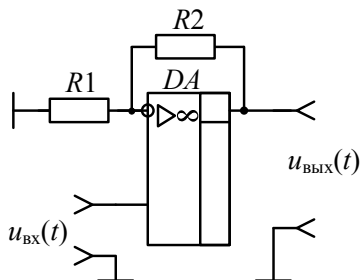


Рис. 2.34 — Неинвертирующий усилитель

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется элементами внешней обратной связи

$$K = -\frac{R_2}{R_1}.$$

где R_1, R_2 — элементы цепи обратной связи (см. рис. 2.33 и 2.34).

Входное сопротивление инвертирующего усилителя

$$R_{\text{вх}} = R_1.$$

Для неинвертирующего усилителя коэффициент усиления и входное сопротивление определяются из соотношений:

$$K = \frac{R_2}{R_1} + 1 ;$$

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх оу}} \frac{K_{\text{оу}}}{K}.$$

где $R_{\text{вх оу}}$ — входное сопротивление ОУ без обратной связи.

Таким образом, коэффициенты усиления в обоих случаях зависят только от отношения сопротивления резисторов R_2 и R_1 и не зависят от коэффициента усиления самого ОУ.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно сопротивлению резистора R_1 , а неинвертирующего зависит от входного сопротивления ОУ $R_{\text{вх оу}}$ без обратной связи и отношения коэффициентов усиления без обратной связи $K_{\text{оу}}$ и с обратной связью K . Таким образом, входное сопротивление неинвертирующего усилителя может достигать очень больших величин.

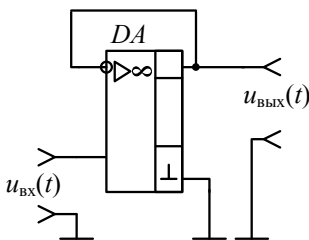


Рис. 2.35 — Повторитель напряжения

На основе неинвертирующего усилителя можно построить повторитель напряжения, коэффициент усиления которого близок к единице, а входное сопротивление велико (рис. 2.35).

Схема, изображенная на рис. 2.36, реализует сложение нескольких входных напряжений с учетом их весовых коэффициентов.

Выходное напряжение этой схемы равно

$$u_{\text{вых}}(t) = -R_{\text{ос}} \cdot \left[\frac{u_{\text{вх}1}(t)}{R_1} + \frac{u_{\text{вх}2}(t)}{R_2} + \frac{u_{\text{вх}3}(t)}{R_3} \right],$$

или

$$u_{\text{вых}}(t) = - \sum_{i=1}^n K_i u_{\text{вх},i}(t) ,$$

где $K_i = R_{\text{ос}} / R_i$ — весовой коэффициент i -го входного напряжения.

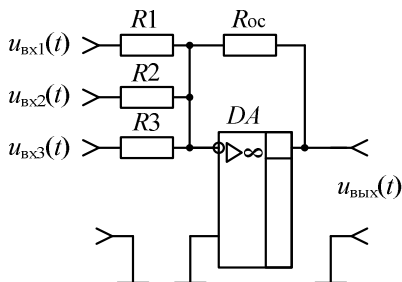


Рис. 2.36 — Сумматор сигналов на основе ОУ

Если коэффициент передачи цепи обратной связи ОУ является частотно зависимым, то в этом случае можно получить устройства, выполняющие операции интегрирования (рис. 2.37) или дифференцирования (рис. 2.38) входных напряжений.

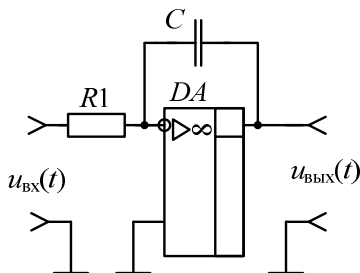


Рис. 2.37 — Интегратор на основе ОУ

Интеграторы (рис. 2.37) являются одним из основных операционных звеньев аналоговой техники. Напряжение на выходе схемы может быть найдено по формуле

$$u_{\text{вых}}(t) = - \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt .$$

Знак минус отражает свойство данной схемы инвертировать сигналы по фазе. При выборе значений R и C , при которых их произведение равно единице, приведенное выше выражение упрощается

$$u_{\text{вых}}(t) = - \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt .$$

Очевидно, что при подаче на вход интегратора постоянного напряжения $u_{\text{вх}}(t) = U_1$, на выходе напряжение будет изменяться линейно в соответствии с выражением

$$u_{\text{вых}}(t) = - \frac{U_1}{RC} t .$$

Это свойство формирования линейно изменяющегося напряжения используется в различных схемах генераторов пилообразного и треугольного напряжения.

На рис. 2.38 изображена схема дифференциатора.

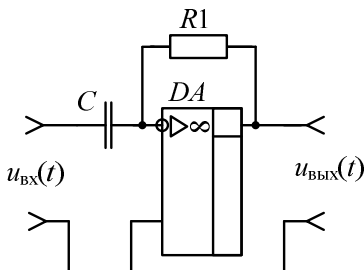


Рис. 2.38 — Дифференциатор на основе ОУ

Выходное напряжение этой схемы является по существу производной от входного напряжения

$$u_{\text{вых}}(t) = -RC \frac{d}{dt} [u_{\text{вх}}(t)] .$$

К сожалению, схема имеет ряд недостатков практического характера. Поскольку отношение сопротивления обратной связи к реактивному сопротивлению конденсатора с увеличением частоты возрастает, то коэффициент усиления данной схемы с увеличением частоты также растет. Таким образом, схема будет усиливать наряду с сигналом и шумы высокой частоты, имеющиеся на входе. В результате этого на выходе шумы могут преувеличить полезный сигнал.

Другой проблемой, возникающей в этой схеме дифференциатора, является его склонность к самовозбуждению.

Если в цепях обратной связи, подключаемых к ОУ, включать нелинейные сопротивления (диоды, варисторы и др.), то можно получить нелинейные функциональные преобразователи.

На рис. 2.39 показан логарифмический, а на рис. 2.40 — антилогарифмический преобразователи и их амплитудные характеристики.

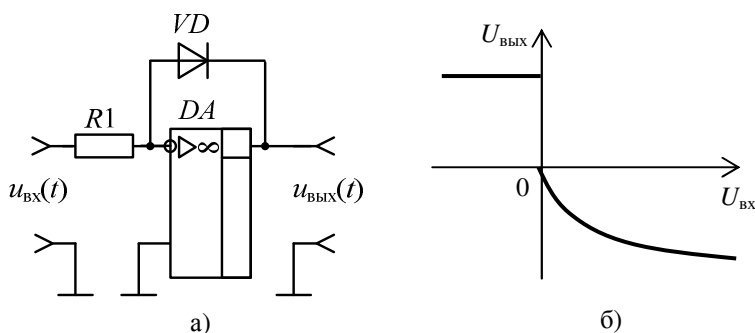


Рис. 2.39 — Логарифмический преобразователь (а) и его амплитудная характеристика (б)

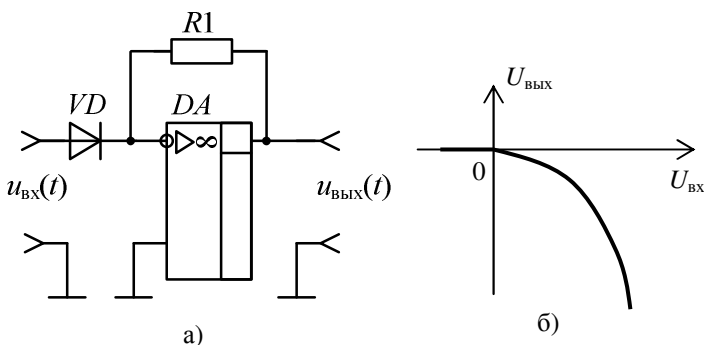


Рис. 2.40 — Антилогарифмический преобразователь (а) и его амплитудная характеристика (б)

Литература по теме: [4]; [7, с. 245 — 315].

Контрольные вопросы по теме

108. Перечислите основные области применения ОУ.

109. Изобразите схему инвертирующего и неинвертирующего усилителей на ОУ?

110. Поясните особенности определения входного сопротивления и коэффициента усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

111. Нарисуйте схему сумматора сигналов на ОУ.

112. Изобразите схемы и амплитудные характеристики логарифмического и антилогарифмического преобразователя на ОУ.

113. Приведите схемы и АЧХ интегрирующего и дифференцирующего усилителей.

114. Перспективы развития усилительных устройств и устройств аналоговой обработки сигналов, построенные на их основе.

2.10. Первое контрольное задание

В первом контрольном задании необходимо дать ответы на теоретические вопросы, приведенные в разделе 2 данного указания в качестве контрольных вопросов по темам. Варианты заданий приведены в таблице 2.1 и выбираются по двум последним цифрам номера зачетной книжки.

Таблица 2.1 — Варианты заданий (номера вопросов) по первому контрольному заданию

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	108	109	110	111	112	113	114	98	99	100
2	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
3	31	31	1	2	3	4	5	6	7	8
	64	65	40	41	42	43	44	45	46	47
	96	97	97	96	95	94	93	92	91	90
	111	112	113	114	100	99	98	114	113	112

Продолжение таблицы 2.1

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80
	111	110	109	108	107	106	105	104	103	102
5	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70
	101	100	99	98	100	101	102	103	104	105
6	29	30	31	32	1	2	3	4	5	6
	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
	69	68	67	66	70	71	72	73	74	75
	98	99	106	107	108	109	110	111	112	113
7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	63	64	65	33	34	35	36	37	38	39
	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	114	98	99	100	101	102	103	104	105	106
8	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	40	41	42	43	44	45	45	46	47	48
	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
	107	108	109	110	111	112	113	114	110	111
9	27	28	29	30	31	32	1	2	3	4
	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
	96	97	69	68	67	66	88	89	90	91
	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ И ВТОРОЕ КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Методические указания к решению задач

Целью данного контрольного задания является проверка усвоения студентами разделов курса «Аналоговые электронные устройства» и умения применять полученные знания на практике анализа схем устройств аналоговой обработки сигналов.

Контрольное задание заключается в решении задач, приведенных в разделе 3 данных методических указаний, и выполняется при изучении курса «Аналоговые электронные устройства». Приступить к решению задач нужно после изучения теоретического материала.

Условия задач должны переписываться полностью с указанием исходных данных и вычерчиванием принципиальной схемы анализируемого каскада. Задачи следует сначала решить в общем виде, а затем подставлять числовые значения. При решении задач следует стремиться к конкретному и четкому изложению. При изложении решения задач необходимо давать краткие пояснения каждого этапа решения и приводить необходимые расчетные формулы. Решения задач не следует перегружать промежуточными алгебраическими преобразованиями, а также выводами формул, имеющихся в литературе.

Варианты второго контрольного задания приведены в таблице 3.1 и выбираются в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

Таблица 3.1 — Варианты заданий (номера задач) по второму контрольному заданию

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	32	33	34	35	36	37	38	39	61	62
	53	54	55	56	57	58	59	60	65	66
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89

Продолжение таблицы 3.1

Предпоследняя цифра номера за- четной книжки	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	21	40	41	42	1	2	3	4	5	6
	63	64	43	44	45	46	47	47	22	23
	67	68	69	93	94	95	96	97	48	49
	90	91	92	100	101	102	103	104	97	98
3	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
	99	70	71	72	73	74	75	76	77	78
4	17	18	19	20	21	39	41	42	1	2
	34	35	36	37	38	40	44	45	46	46
	60	61	62	63	64	43	65	66	67	68
	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	47	48	49	50	51	52	22	23	24	25
	69	90	91	92	93	94	53	54	55	56
	89	100	101	102	103	104	95	96	97	98
6	13	14	15	16	17	18	19	20	21	35
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	40
	57	58	59	60	61	62	63	64	43	44
	99	70	71	72	73	74	75	76	77	78
7	36	37	1	2	3	4	5	6	7	8
	41	42	38	39	49	50	51	52	53	54
	45	46	47	48	65	66	67	68	69	88
	79	80	81	82	83	84	85	86	87	100
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	55	56	57	58	22	23	24	25	26	27
	89	90	91	92	59	60	61	62	63	64
	101	102	103	104	93	94	95	96	97	98
9	19	20	21	31	32	33	1	2	3	4
	28	29	30	40	41	42	34	35	36	37
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	99	70	75	80	84	86	93	94	95	96

3.2. Задачи по дисциплине «Аналоговые электронные устройства»

Задача № 1.

Дан трехкаскадный усилитель. Определите входное напряжение, если коэффициенты усиления каскадов усилителя соответственно равны: $K_1 = 100$; $K_2 = 60$; $K_3 = 10$. Выходное напряжение усилителя $U_{\text{вых}} = 5$ В.

Задача № 2.

Напряжения на входе и выходе усилителя соответственно равны: $U_{\text{вх}} = 0,1$ В; $U_{\text{вых}} = 20$ В. Определите коэффициент усиления усилителя в отвлеченных числах и децибелах.

Задача № 3.

Определите сквозные коэффициенты усиления по напряжению и току, если сопротивление источника сигнала $R_{\Gamma} = 1$ кОм, его э.д.с. $E_{\Gamma} = 10$ мВ, входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}} = 4$ кОм, коэффициент усиления усилителя $K = 100$, выходное сопротивление усилителя $R_{\text{вых}} = 100$ Ом, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 0,5$ кОм.

Задача № 4.

Каскады четырехкаскадного усилителя обеспечивают следующее усиление: $K_1 = 40$ дБ; $K_2 = 34$ дБ; $K_3 = 20$ дБ; $K_4 = 12$ дБ. Определите напряжения на входе каждого каскада, если $U_{\text{вых}} = 10$ В.

Задача № 5.

Сколько однотипных каскадов следует включить, чтобы обеспечить общее усиление 86 дБ, если каждый каскад может обеспечить коэффициент усиления $K = 12$?

Задача № 6.

Определите коэффициент частотных искажений каждого каскада, если на весь усилитель допустимы искажения в 3 дБ? Усилитель содержит 4 однотипных каскада.

Задача № 7.

Определите амплитуду напряжения на входе усилителя, если сопротивление нагрузки равно 20 Ом, $P_{\text{вых}} = 10$ Вт, а усиление составляет 66 дБ.

Задача № 8.

Частотные искажения резистивного усилительного каскада усилителя на нижней частоте определяются емкостью разделительного конденсатора

и равны 1дБ. Чему будут равны частотные искажения на этой же частоте, если емкость разделительного конденсатора C_p уменьшить вдвое?

Задача № 9.

Рассчитайте в децибелах общий коэффициент частотных искажений трехкаскадного усилителя, если $M_1 = M_2 = 1,04$; $M_3 = 1,2$.

Задача № 10.

Эффективное напряжение шумов на выходе усилителя равно 2 мВ при сопротивлении нагрузки 100 Ом. Определите максимальную выходную мощность, если динамический диапазон усилителя составляет 70 дБ, а минимальный сигнал в 3,16 раза превышает уровень шумов.

Задача № 11.

Определите коэффициент второй гармоники коллекторного тока, если известно, что при $R_k = 200$ Ом транзистор отдает полезную мощность 90 мВт, а показания миллиамперметра, стоящего в коллекторной цепи и измеряющего постоянную составляющую коллекторного тока, при подаче на вход сигнала, увеличивается на 2 мА. (При решении задачи аппроксимацию сквозной характеристики транзистора ограничить степенным полиномом второго порядка).

Задача № 12.

Рассчитайте результирующую величину коэффициента гармоник K_{Γ} при наличии в выходной цепи транзистора трех гармонических составляющих: $I_1 = 40$ мА ; $I_2 = 2$ мА и $I_3 = 0,4$ мА.

Задача № 13.

Определите коэффициент гармоник двухкаскадного усилителя, если коэффициенты по второй, третьей и четвертой гармоникам первого и второго каскадов соответственно равны: $K^*_{\Gamma 2} = 1\%$, $K^{**}_{\Gamma 2} = 2,0\%$, $K^*_{\Gamma 3} = 0,5\%$, $K^{**}_{\Gamma 3} = 1\%$, $K^*_{\Gamma 4} = 0,1\%$, $K^{**}_{\Gamma 4} = 0,5\%$.

Задача № 14.

На сколько децибелл возрастет усиления каскада, если сопротивление нагрузки увеличится от $R_n = R_i$ до значения $R_n = 3R_i$?

Задача № 15.

Найдите амплитуду выходного тока транзистора, если напряжение на входе каскада равно 50 мВ, усиление каскада составляет 26 дБ, сопротивление нагрузки равно 2 кОм.

Задача № 16.

Определите сопротивление нагрузки усилительного каскада на транзисторе, если $R_i = 500 \text{ Ом}$, и при параллельном включении в схему второго транзистора выходное напряжение возрастает на 2,5 дБ.

Задача № 17.

Входная емкость первого каскада усилителя равна 10 пФ. Найдите на частоте 1 МГц емкость составляющую входного сопротивления усилителя. Входной каскад охвачен последовательной отрицательной обратной связью, при этом петлевое усиление $\beta K = 3$.

Задача № 18.

К выходу усилителя с выходным сопротивлением $R_{\text{вых}} = 1 \text{ кОм}$ подключена чисто емкостная нагрузка $C_n = 100 \text{ пФ}$. Чему равна верхняя граничная частота полосы пропускания усилителя, измеренная по уровню $M_v = -3 \text{ дБ}$?

Задача № 19.

В результате введения обратной связи напряжение на выходе усилителя упало на 12 дБ. Найдите коэффициент усиления без обратной связи, если $\beta = 0,1$.

Задача № 20.

Найдите коэффициент передачи цепи отрицательной обратной связи для снижения частотных искажений с 6 дБ до 1 дБ, если $K_0 = 100$.

Задача № 21.

Определить сопротивление R_3 и емкость C_3 в цепи автоматического смещения усилителя на полевом транзисторе (рис. 3.1), а также мощность, рассеиваемую на сопротивлении R_3 , если ток стока $I_c = 6 \text{ мА}$; напряжение затвор—исток $U_{зи} = -4,5 \text{ В}$. Цепь $R_3 C_3$ практически не должна вносить частотных искажений на частоте $f_n = 50 \text{ Гц}$.

Задача № 22.

Определить коэффициент частотных искажений M_n на частоте 50 Гц для схемы, изображенной на рис. 3.1, если $R_n = 5 \text{ кОм}$, $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $R_2 = 5 \text{ кОм}$, $R_n = 10 \text{ кОм}$, $S = 5 \text{ мА/В}$, $C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}$. Влиянием конденсатора C_3 на частотные искажения пренебречь.

Задача № 23.

Определите входное, выходное сопротивления и коэффициент усиления по напряжению каскада, изображенного на рис. 3.1. В схеме установ-

лен полевой транзистор типа КП 304 Д, имеющий крутизну $S_{\max} = 5 \text{ мА/В}$, $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$.

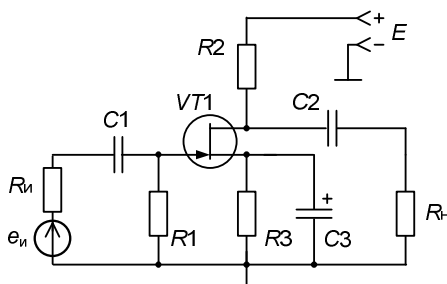


Рис. 3.1 — Каскад с общим истоком на полевом транзисторе

Задача № 24.

Полевой транзистор, имеющий крутизну $S = 2 \text{ мА/В}$, включен в усилительный каскад по схеме с общим истоком (рис. 3.1). Сопротивление резистора нагрузки $R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 20 \text{ кОм}$. Определить коэффициент усиления по напряжению.

Задача № 25.

Рассчитать напряжение источника питания в усилителе (рис. 3.1), если напряжение между стоком и истоком $U_{\text{си}} = 4 \text{ В}$, ток стока $I_{\text{с}} = 1 \text{ мА}$, сопротивления резисторов $R_2 = 500 \text{ Ом}$, $R_3 = 1,5 \text{ кОм}$.

Задача № 26.

Определите в области средних частот входное, выходное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению каскада на полевом транзисторе, изображенного на рис. 3.2. Если крутизна транзистора $S = 5 \text{ мА/В}$, $R_1 = 3,3 \text{ МОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$.

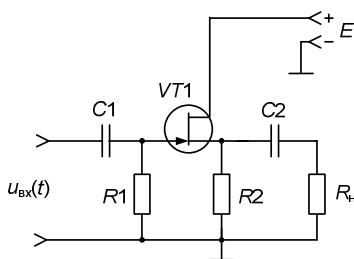


Рис. 3.2 — Каскад с общим стоком на полевом транзисторе

Задача № 27.

Определите входное сопротивление каскада с общим коллектором (рис. 3.3), если $R_1 = R_2 = 16 \text{ кОм}$, $R_3 = 1 \text{ кОм}$, $R_n = 500 \text{ Ом}$, $h_{21Б} = 0,96$. Считать, что конденсаторы C_1 и C_2 имеют ничтожно малое сопротивление.

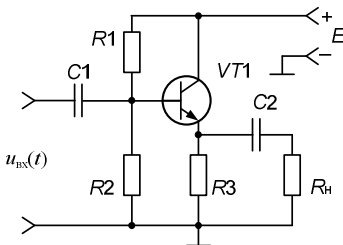


Рис. 3.3 — Каскад с общим коллектором

Задача № 28.

Рассчитайте входное сопротивление каскада с общим коллектором (рис. 3.3), если сопротивление в цепи эмиттера $R_3 = 400 \text{ Ом}$, сопротивления делителя в цепи базы $R_1 = 50 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, сопротивление нагрузки $R_n = 5 \text{ кОм}$, статический коэффициент передачи по току транзистора $h_{21Э} = 20$.

Задача № 29.

Как изменится входное сопротивление каскада с общим коллектором (рис. 3.3), если элементы схемы имеют параметры, указанные в задаче №28, но применен транзистор с $h_{21Э} = 40$.

Задача № 30.

Найдите сопротивление резистора R_1 в усилителе изображенном на рис. 3.3, если напряжение источника питания $E = 12 \text{ В}$, напряжение между базой и эмиттером равно $0,66 \text{ В}$, ток коллектора $I_k = 2,8 \text{ мА}$, ток базы $I_б = 0,32 \text{ мА}$, сопротивления резисторов $R_2 = 2 \text{ кОм}$, и $R_3 = 720 \text{ Ом}$.

Задача № 31.

Условно изобразите пути протекания постоянных составляющих тока базы, коллектора и эмиттера транзистора, указав элементы усилителя по схеме (рис. 3.3), через которые эти токи протекает.

При действии на входе синусоидального напряжения изобразите временные диаграммы тока базы, тока эмиттера, напряжений на эмиттере транзистора VT1 и на нагрузке R_n .

Задача № 32.

По выходным характеристикам транзистора *BC546* (см. прил. А) в схеме с ОЭ в рабочей точке с напряжением коллектор-эмиттер $U_{кэ} = 10$ В и током базы $I_б = 0,15$ мА, определить статический коэффициент передачи по току $h_{21э}$.

Задача № 33.

По выходным характеристикам транзистора *MPS5172* (см. прил. А) в схеме с ОЭ в рабочей точке с напряжением коллектор-эмиттер $U_{кэ} = 10$ В и током базы $I_б = 0,2$ мА определить выходную проводимость транзистора $h_{22э}$.

Задача № 34.

Транзистор *MPS5172* включен по схеме с общим коллектором. Воспользовавшись выходными характеристиками транзистора (см. прил. А) в рабочей точке с напряжением коллектор-эмиттер $U_{кэ} = 10$ В и током базы $I_б = 0,2$ мА определите выходную проводимость. Считайте, что коэффициент передачи по напряжению каскада равен $K = 0,98$.

Задача № 35.

Условно изобразить пути протекания постоянных составляющих токов базы, коллектора и эмиттера транзистора, указав элементы усилителя по схеме рис. 3.4, через которые протекают эти токи.

При действии на входе синусоидального напряжения изобразить временные диаграммы тока базы, коллектора, напряжений на коллекторе транзистора и на нагрузке усилителя.

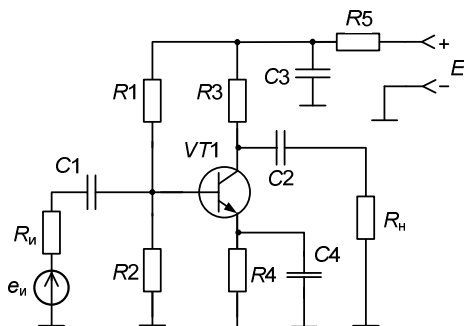


Рис. 3.4 — Каскад с общим эмиттером

Задача № 36.

В схеме изображенной на рис. 3.4, дано: $R_3 = 5$ кОм, $R_4 = 1$ кОм, $E = 24$ В, падение напряжения на резисторе R_5 составляет $U_{R5} = 4$ В, ток базы

транзистора $I_6 = 0,1$ мА. В схеме используется транзистор с $h_{219} = 20$. Определить напряжение коллектор—эмиттер.

Задача № 37.

Рассчитайте сопротивление резистора R_4 в усилителе, изображенном на рис. 3.4, если напряжение источника питания $E = 14$ В, напряжение между базой и эмиттером равно 0,7 В, ток коллектора $I_k = 3$ мА, ток базы $I_6 = 0,12$ мА, сопротивление резисторов $R_1 = 6,2$ кОм, $R_5 = R_2 = 2$ кОм.

Задача № 38.

Определите величину тока коллектора в усилителе (рис. 3.4), если напряжение источника питания $E = 18$ В, напряжение между базой и эмиттером равно 0,7 В, ток базы $I_6 = 0,1$ мА, сопротивления резисторов $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 2$ кОм и $R_4 = 1$ кОм. Падение напряжения на резисторе R_5 равно 3 В.

Задача № 39.

Найдите напряжение источника питания в усилителе (рис. 3.4), если напряжение между базой и эмиттером транзистора равно 0,66 В, ток коллектора $I_k = 3,3$ мА, ток базы $I_6 = 0,1$ мА, сопротивления резисторов $R_1 = 8,2$ кОм, $R_2 = 3,6$ кОм, $R_4 = 1$ кОм, $R_5 = 54$ Ом.

Задача № 40.

У германиевого транзистора при температуре окружающей среды $t = 20^\circ\text{C}$ ток базы $I_6 = 100$ мкА, обратный ток коллекторного перехода $I_{к60} = 10$ мкА. Предполагая, что ток $I_{к60}$ удваивается при увеличении температуры на каждые 10°C , определить ток коллектора в схеме с ОЭ при температурах 20, 40 и 60°C . Считать, что коэффициент передачи тока базы h_{219} постоянен в рассматриваемом диапазоне температур и равен 49.

Задача № 41.

На коллекторном переходе транзистора выделяется мощность $P_k = 25$ мВт. Тепловое сопротивление коллекторный переход—окружающая среда $R_{пс} = 0,5$ К/мВт. Какую температуру имеет коллекторный переход, если температура окружающей среды $t_c = 40^\circ\text{C}$?

Задача № 42.

Какую температуру будет иметь коллекторный переход транзистора, рассмотренного в предыдущей задаче, если с использованием теплоотвода сопротивление переход—среда уменьшилось до $R_{пс} = 0,3$ К/мВт?

Задача № 43.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора 2SC4617 (см. Прил. А), мощность $P_{\text{н}}$, отдаваемую в нагрузку усилителя (рис. 3.5), если транзисторы работают в режиме B , напряжение источника питания $E = 15$ В. Амплитуда тока базы составляет $I_{\text{бм}} = 0,1$ мА. Сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 125$ Ом.

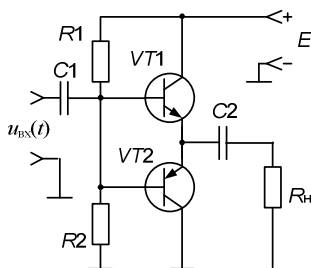


Рис. 3.5 — Двухтактный усилитель с однополярным источником питания

Задача № 44.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора 2SC4617 (см. Прил. А), мощность $P_{\text{н}}$, отдаваемую в нагрузку усилителя (рис. 3.5), если транзисторы работают в режиме B , напряжение источника питания $E = 15$ В. Действующее значение тока базы равно $I_{\text{б}} = 0,1$ мА. Сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 125$ Ом.

Задача № 45.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора 2SA1048 (см. Прил. А), мощность $P_{\text{н}}$, отдаваемую в нагрузку усилителя (рис. 3.6), если транзисторы работают в режиме B . Амплитуда тока базы составляет $I_{\text{бм}} = 1,5$ мА. Сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 30$ Ом. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 6,3$ В.

Задача № 46.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора 2SA1048 (см. Прил. А), мощность $P_{\text{н}}$, отдаваемую в нагрузку усилителя (рис. 3.6), если транзисторы работают в режиме B . Амплитуда тока базы составляет $I_{\text{бм}} = 2,0$ мА. Сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 20$ Ом. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 5$ В.

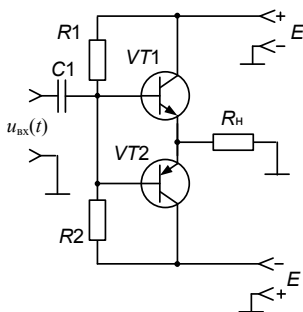


Рис. 3.6 — Двухтактный усилитель с двухполярным источником питания

Задача № 47.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *BC546* (см. Прил. А), амплитуду напряжения на нагрузке $R_n = 150 \text{ Ом}$ в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{bm} = 0,4 \text{ мА}$. Напряжение источника питания $E = 24 \text{ В}$.

Задача № 48.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *BC546* (см. Прил. А), амплитуду напряжения на нагрузке $R_n = 200 \text{ Ом}$ в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{bm} = 0,4 \text{ мА}$. Напряжение источника питания $E = 36 \text{ В}$.

Задача № 49.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *MPS5172* (см. Прил. А), амплитуду напряжения на нагрузке $R_n = 450 \text{ Ом}$ в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{bm} = 0,4 \text{ мА}$. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 36 \text{ В}$.

Задача № 50.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *MPS5172* (см. Прил. А), амплитуду напряжения на нагрузке $R_n = 240 \text{ Ом}$ в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{bm} = 0,3 \text{ мА}$. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 24 \text{ В}$.

Задача № 51.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *BC638* (см. Прил. А), мощность P_0 , потребляемую от источника питания выходной цепью транзисторов в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Напряжение источника питания $E = 50$ В. Амплитуда тока базы составляет $I_{бm} = 1,0$ мА. Сопротивление резистора $R_n = 60$ Ом.

Задача № 52.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *BC638* (см. Прил. А), мощность P_0 , потребляемую от источника питания выходной цепью транзисторов в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Напряжение источника питания $E = 60$ В. Амплитуда тока базы составляет $I_{бm} = 1,0$ мА. Сопротивление резистора $R_n = 150$ Ом.

Задача № 53.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *BU406* (см. Прил. А), мощность P_0 , потребляемую от источника питания выходной цепью транзисторов в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{бm} = 120$ мА. Сопротивление резистора $R_n = 2$ Ом. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 9$ В.

Задача № 54.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *BU406* (см. Прил. А), мощность P_0 , потребляемую от источника питания выходной цепью транзисторов в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{бm} = 200$ мА. Сопротивление резистора $R_n = 2$ Ом. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 10$ В.

Задача № 55.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *2SB857* (см. Прил. А), амплитуду тока на нагрузке $R_n = 2$ Ом в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Амплитуда тока базы составляет $I_{бm} = 40$ мА. Напряжение источника питания $E = 18$ В.

Задача № 56.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *2SB857* (см. Прил. А), амплитуду тока на нагрузке $R_n = 4$ Ом в усилителе по схеме,

изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *B*. Амплитуда тока базы составляет $I_{бм} = 40$ мА. Напряжение источника питания $E = 24$ В.

Задача № 57.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *KTD998* (см. Прил. А), амплитуду тока на нагрузке $R_n = 1,5$ Ом в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *B*. Амплитуда тока базы составляет $I_{бм} = 200$ мА. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 12$ В.

Задача № 58.

Найти, пользуясь выходными характеристиками транзистора *KTD998* (см. Прил. А), амплитуду тока на нагрузке $R_n = 2$ Ом в усилителе по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *B*. Амплитуда тока базы составляет $I_{бм} = 300$ мА. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 12$ В.

Задача № 59.

Рассчитать, используя выходные характеристики транзистора *BC640* (см. Прил. А), КПД выходной цепи усилителя по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *B*. Напряжение источника питания $E = 80$ В, сопротивление резистора $R_n = 120$ Ом. Амплитуда тока базы составляет $I_{бм} = 1,4$ мА.

Задача № 60.

Рассчитать, используя выходные характеристики транзистора *BC640* (см. Прил. А), КПД выходной цепи усилителя по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *B*. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 40$ В, сопротивление резистора $R_n = 120$ Ом. Амплитуда тока базы составляет $I_{бм} = 1,4$ мА.

Задача № 61.

Рассчитать, используя выходные характеристики транзистора *KTD998* (см. Прил. А), КПД выходной цепи усилителя по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *B*. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 12$ В, сопротивление резистора $R_n = 1,5$ Ом. Амплитуда тока базы составляет $I_{бм} = 300$ мА.

Задача № 62.

Рассчитать, используя выходные характеристики транзистора *KTD998* (см. Прил. А), КПД выходной цепи усилителя по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Напряжение источника питания $E = 27$ В, сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 1,5$ Ом. Амплитуда тока базы составляет $I_{\text{бм}} = 200$ мА.

Задача № 63.

Рассчитать, используя выходные характеристики транзистора *BU406* (см. Прил. А), КПД выходной цепи усилителя по схеме, изображенной на рис. 3.6, если транзисторы работают в режиме *В*. В схеме используется двухполярный источник питания с напряжением $E = \pm 9$ В, сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 3$ Ом. Амплитуда тока базы составляет $I_{\text{бм}} = 80$ мА.

Задача № 64.

Рассчитать, используя выходные характеристики транзистора *2SB858* (см. Прил. А), КПД выходной цепи усилителя по схеме, изображенной на рис. 3.5, если транзисторы работают в режиме *В*. Напряжение источника питания $E = 18$ В, сопротивление резистора $R_{\text{н}} = 4,5$ Ом. Амплитуда тока базы составляет $I_{\text{бм}} = 30$ мА.

Задача № 65.

Определить сопротивление резистора R_3 в усилителе, изображенном на рис. 3.7, если напряжение на резисторе R_2 равно 1,4 В, напряжение на резисторе R_4 равно 3 В, напряжение между базой и эмиттером транзистора *VT1* равно 0,7 В, ток базы транзистора *VT1* равен 0,1 мА.

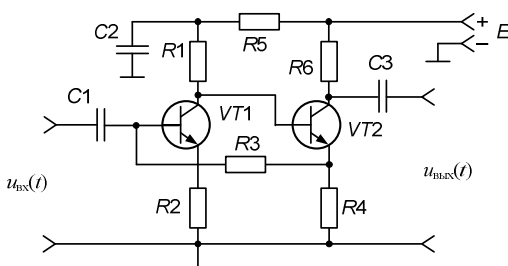


Рис. 3.7 — Двухкаскадный усилитель

Задача № 66.

Предположив, что оба транзистора в схеме (рис. 3.8) идентичны, определите примерное постоянное напряжение на выходах $U_{\text{к1}}$ и $U_{\text{к2}}$ относи-

тельно земли, когда оба входа заземлены. В схеме установлены резисторы: $R_{K1} = R_{K2} = 5 \text{ кОм}$; $R_1 = 6 \text{ кОм}$. Напряжения источников питания $E_1 = +12 \text{ В}$; $E_2 = -12 \text{ В}$.

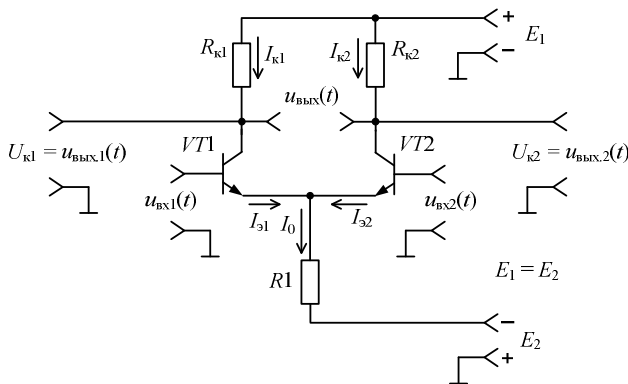


Рис. 3.8 — Дифференциальный каскад

Задача № 67.

Предположив, что оба транзистора в схеме, изображенной на рис. 3.8, идентичны и имеют $h_{21э} = 100$ и $h_{11э} = 120 \text{ Ом}$, определите примерное значение дифференциального выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}(t)$, когда постоянные напряжения на входах относительно земли равны $u_{\text{ВХ1}}(t) = 2 \text{ мВ}$; $u_{\text{ВХ2}}(t) = -1 \text{ мВ}$. Внутренние сопротивления источников сигналов пренебрежимо малы. Принять, что $R_{K1} = R_{K2} = 5 \text{ кОм}$.

Задача № 68.

Предположив, что оба транзистора в схеме (рис. 3.8) идентичны, определите приближенное значение токов коллекторов транзисторов VT1 и VT2, когда оба входа заземлены. В схеме установлены резисторы: $R_{K1} = R_{K2} = 5 \text{ кОм}$; $R_1 = 6 \text{ кОм}$. Напряжения источников питания $E_1 = +12 \text{ В}$; $E_2 = -12 \text{ В}$.

Задача № 69.

Предположив, что оба транзистора в схеме (рис. 3.8) идентичны, определите приближенное значение токов эмиттеров транзисторов VT1 и VT2, когда оба входа заземлены. Напряжение база—эмиттер транзисторов равно $U_{\text{бэ}} = 0,7 \text{ В}$. Сопротивление резистора $R_1 = 10 \text{ кОм}$. Напряжения источников питания $E_1 = +12 \text{ В}$; $E_2 = -12 \text{ В}$.

Задача № 70.

Для схемы (рис. 3.9) вычислите значение её коэффициента усиления по напряжению, когда переключатель находится в положении 1.

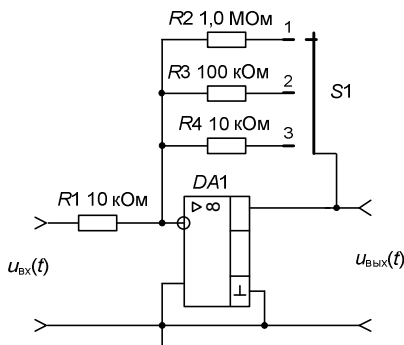


Рис. 3.9 — Инвертирующий усилитель на ОУ

Задача № 71.

Для схемы (рис. 3.9) рассчитайте значение коэффициента усиления по напряжению, когда переключатель находится в положении 2.

Задача № 72.

Для схемы (рис. 3.9) рассчитайте значение коэффициента усиления по напряжению, когда переключатель находится в положении 3.

Задача № 73.

Для схемы (рис. 3.9) рассчитайте значение входного сопротивления, когда переключатель находится в положении 1.

Задача № 74.

Как будет изменяться входное сопротивление схемы (рис. 3.9) при переключении переключателя?

Задача № 75.

Для схемы (рис. 3.9) рассчитайте значение верхней граничной частоты полосы пропускания (при частотных искажениях равных -3 дБ), когда переключатель находится в положении 3. Частота единичного усиления микросхемы $f_1 = 3$ МГц.

Задача № 76.

Для схемы (рис. 3.9) рассчитайте значение верхней граничной частоты полосы пропускания (при частотных искажениях равных -3 дБ), когда переключатель находится в положении 1. Частота единичного усиления микросхемы $f_1 = 1$ МГц.

Задача № 77.

Для схемы (рис. 3.10) рассчитайте значение коэффициента усиления по напряжению, когда переключатель находится в положении 1.

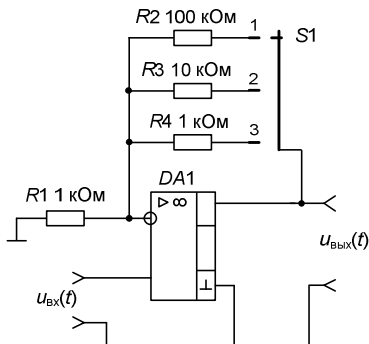


Рис. 3.10 — Неинвертирующий усилитель на ОУ

Задача № 78.

Для схемы (рис. 3.10) рассчитайте значение коэффициента усиления по напряжению, когда переключатель находится в положении 2.

Задача № 79.

Для схемы (рис. 3.10) рассчитайте значение коэффициента усиления по напряжению, когда переключатель находится в положении 3.

Задача № 80.

Для схемы (рис. 3.10) рассчитайте значение верхней граничной частоты полосы пропускания (при частотных искажениях равных -3 дБ), когда переключатель находится в положении 3. Частота единичного усиления микросхемы $f_1 = 1$ МГц.

Задача № 81.

Для схемы (рис. 3.10) рассчитайте значение верхней граничной частоты полосы пропускания (при частотных искажениях равных -3 дБ), когда переключатель находится в положении 1. Частота единичного усиления микросхемы $f_1 = 3$ МГц.

Задача № 82.

Если в схеме, изображенной на рис. 3.11, напряжение источника сигналов составляет 2 В, $R_{\text{и}} = 50$ кОм, то чему равно напряжение на выходе схемы.

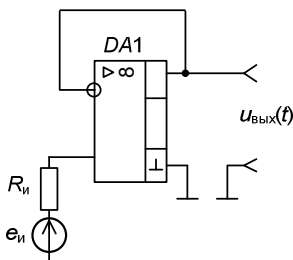


Рис. 3.11 — Повторитель напряжения на ОУ

Задача № 83.

Если в схеме, изображенной на рис. 3.11, напряжение источника сигналов равно 3 В, $R_{и} = 150 \text{ кОм}$, а на выход схемы подключено сопротивление нагрузки $R_{н} = 1 \text{ кОм}$, то чему равно напряжение на выходе.

Задача № 84.

В каком диапазоне можно перестраивать коэффициент усиления схемы, показанной на рис. 3.12?

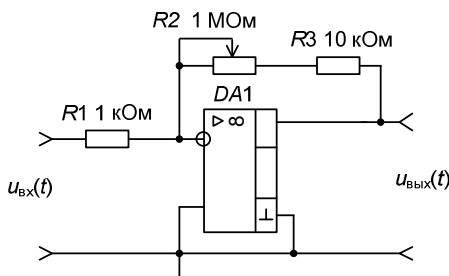


Рис. 3.12 — Инвертирующий усилитель с регулировкой усиления

Задача № 85.

В каком диапазоне можно перестраивать коэффициент усиления схемы, изображенной на рис. 3.13?

Задача № 86.

Если в схеме (рис. 3.14) $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ кОм}$, $R_4 = 10 \text{ кОм}$, $e_{и1} = e_{и2} = e_{и3} = 10 \text{ мВ}$, то чему равно напряжение на выходе операционного усилителя.

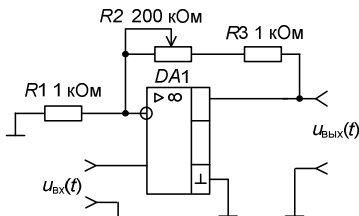


Рис. 3.13 — Неинвертирующий усилитель с регулировкой усиления

Задача № 87.

Если в схеме (рис. 3.14) $e_{и1} = e_{и2} = e_{и3} = 20$ мВ, то чему равно напряжение $u_{вых}(t)$ этой схемы?

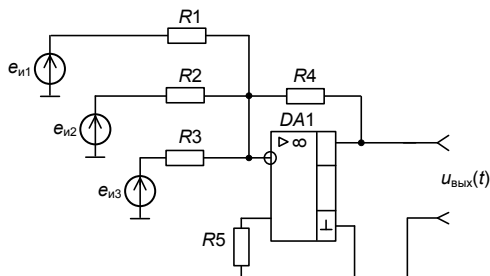


Рис. 3.14 — Сумматор входных напряжений на ОУ

Задача № 88.

В схеме (рис. 3.14) $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ кОм, $R_4 = 10$ кОм, то какое следует взять сопротивление резистора R_5 для минимизации дрейфа?

Задача № 89.

В схеме (рис. 3.14) $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 2$ кОм, $R_3 = 5$ кОм, $R_4 = 5$ кОм, то какое следует взять сопротивление резистора R_5 для минимизации дрейфа?

Задача № 90.

Усилитель выполнен (см. рис. 3.15) на ОУ К140УД9, у которого значение входного тока смещения $I_{см} = 350$ нА. Предскажите значение выходного напряжения, вызванного входным током, если сопротивления резисторов $R_{и} = 1$ кОм; $R_1 = 3$ кОм; $R_2 = 33$ кОм; $R_3 = 0$.

Задача № 91.

Усилитель выполнен (см. рис. 3.15) на ОУ К140УД9, у которого паспортное значение разностного входного тока смещения $I_{вх,разн} = 20$ нА. Определите значение выходного напряжения, вызванного разностным вход-

ным током, если сопротивления резисторов $R_{\text{И}} = 1 \text{ кОм}$; $R_1 = 1 \text{ кОм}$; $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $R_3 = 1,7 \text{ кОм}$.

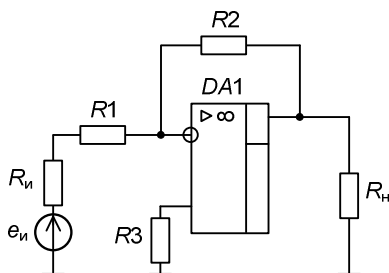


Рис. 3.15 — Инвертирующий усилитель

Задача № 92.

Изобразите результирующую форму сигнала $u_{\text{вых}}(t)$ на графике для схемы (рис. 3.16), если в данной схеме $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $C_1 = 1 \text{ мкФ}$. Входное напряжение имеет форму, показанную на рис. 3.17. Предполагается, что ОУ идеальный, а конденсатор C_1 первоначально разряжен. Рисунок должен быть выполнен в масштабе.

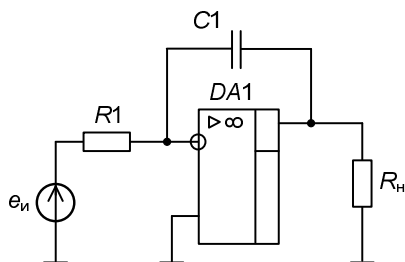


Рис. 3.16 — Интегратор напряжения на ОУ

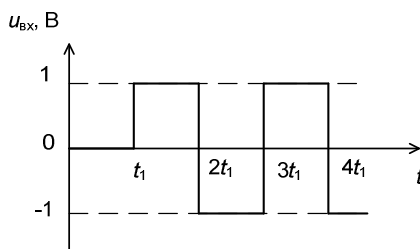


Рис. 3.17

Задача № 93.

Изобразите результирующую форму сигнала $u_{\text{вых}}(t)$ на графике для схемы (рис. 3.16), если в данной схеме $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $C_1 = 1 \text{ мкФ}$. Входное напряжение имеет форму, показанную на рис. 3.18. Предполагается, что ОУ идеальный, а конденсатор C_1 первоначально разряжен. Рисунок должен быть выполнен в масштабе.

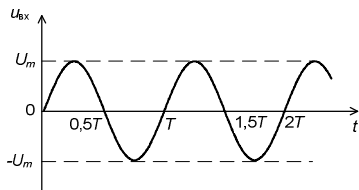


Рис. 3.18

Задача № 94.

Изобразите результирующую форму сигнала $u_{\text{вых}}(t)$ на графике для дифференциатора, схема которого изображена на рис. 3.19, если $e_{\text{и}}(t)$ имеет форму, показанную на рис. 3.20. Предполагается, что ОУ идеален, а конденсатор C_1 первоначально разряжен.

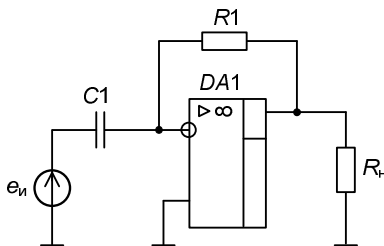


Рис. 3.19 — Дифференциатор напряжения на ОУ

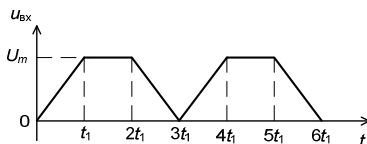


Рис. 3.20

Задача № 95.

Изобразите результирующую форму сигнала $u_{\text{вых}}(t)$ на графике для дифференциатора, схема которого изображена на рис. 3.19, если $e_{\text{и}}(t)$ имеет

форму, показанную на рис. 3.18. Предполагается, что ОУ идеален, а конденсатор C_1 первоначально разряжен.

Задача № 96.

Для схемы, изображенной на рисунке 3.15, найдите, какой величины нужно установить резистор R_3 для уменьшения или полного устранения выходного напряжения смещения нуля, вызываемого входным током смещения? Внутреннее сопротивление источника сигналов пренебрежимо мало, $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 100 \text{ кОм}$.

Задача № 97.

Для схемы (рис. 3.21) определите, какая частота ослабляется, если $R_1 = R_2 = 10 \text{ МОм}$, $C_1 = 540 \text{ пФ}$, $R_3 = 5 \text{ МОм}$, $C_2 = C_3 = 270 \text{ пФ}$.

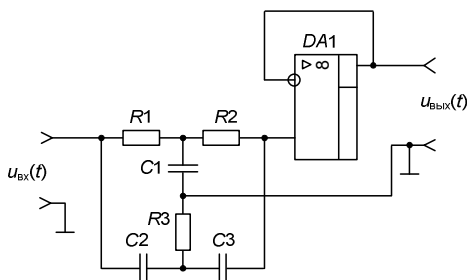


Рис. 3.21 — Режекторный фильтр на ОУ

Задача № 98

Если на вход схемы (рис. 3.22) подано постоянное напряжение величиной $+10 \text{ мВ}$, то чему равно напряжение на выходе?

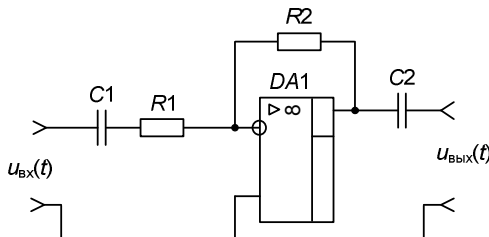


Рис. 3.22 — Усилитель низкой частоты

Задача № 99.

В схеме, изображенной на рис. 3.22, реактивные сопротивления всех конденсаторов пренебрежимо малы, а входной сигнал — синусоида с ам-

плитудой 0,2 мВ, определите амплитуду выходного напряжения, если $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 20 \text{ кОм}$.

Задача № 100.

Определите на средних частотах входное сопротивление каскада (рис. 3.23) при положениях 1 и 2 переключателя $S1$. Транзистор имеет следующие параметры: $h_{113} = 500 \text{ Ом}$, $h_{213} = 30$, $h_{223} = 20 \text{ мкСим}$. В схеме установлены резисторы $R_1 = 50 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_3 = 3 \text{ кОм}$, $R_4 = R_5 = 200 \text{ Ом}$.

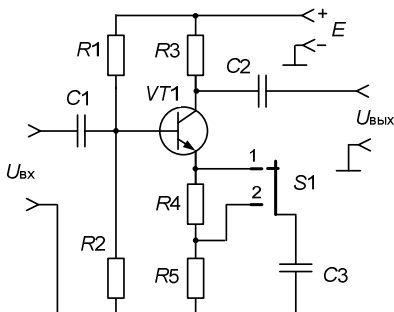


Рис. 3.23 — Усилитель с обратной связью

Задача № 101.

Определите на средних частотах выходное сопротивление каскада (рис. 3.23) при положениях 1 и 2 переключателя $S1$. Параметры транзистора и номиналы элементов схемы указаны в задаче № 100.

Задача № 102.

Определите коэффициент усиления каскада (рис. 3.23) на средних частотах при положениях 1 и 2 переключателя $S1$. Параметры транзистора и номиналы элементов схемы указаны в задаче № 100.

Задача № 103.

Определите изменение неустойчивости коэффициента усиления каскада (рис. 3.23) при положениях 1 и 2 переключателя $S1$. Параметры транзистора и номиналы элементов схемы указаны в задаче № 100.

Задача № 104.

Определите, во сколько раз изменится коэффициент гармоник каскада (рис. 3.23) при положениях 1 и 2 переключателя $S1$. Параметры транзистора и номиналы элементов схемы указаны в задаче № 100.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства / Г.В. Войшвилло. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 2005. — 264 с.
2. Цыкин Г.С. Усилительные устройства / Г.С. Цыкин. — 4-е изд. перераб. — М.: Связь, 2001. — 368 с.
3. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства / И.Г. Мамонкин. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Связь, 2007. — 360 с.
4. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре / В.Л. Шило. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Сов. радио, 1989. — 274 с.
5. Остапенко Г.С. Усилительные устройства / Г.С. Остапенко. — М.: Радио и связь, 1999. — 400 с.
6. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. — М.: Энергия, 2002. — 521 с.
7. Павлов В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. — М.: Радио и связь, 2007. — 320 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Выходные характеристики транзисторов, встречающихся в контрольных заданиях

2SC4617

Маломощный усилительный *n-p-n* транзистор общего назначения.

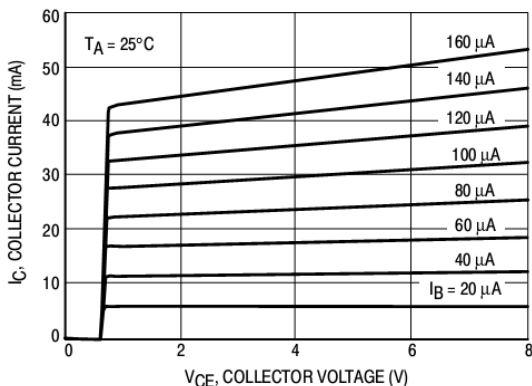


Рис. А.1 — Выходные характеристики транзистора 2SC4617

2SA1048

Маломощный усилительный *p-n-p* транзистор общего назначения.
Комплементарная пара к транзистору 2SC2458.

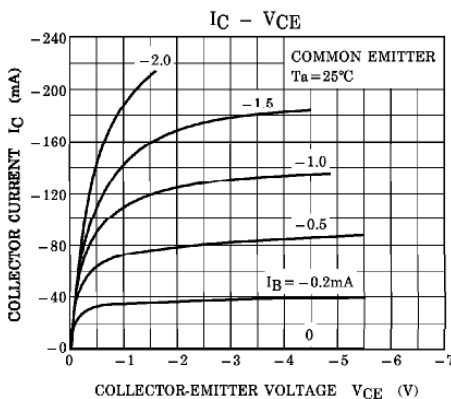


Рис. А.3 — Выходные характеристики транзистора 2SA1048

BC546 ... BC550

Усилительные n - p - n транзисторы общего назначения.
Комплемментарные пары — BC556... BC556

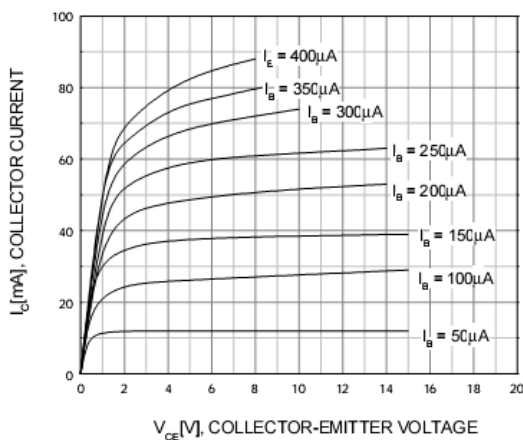


Рис. А.5 — Выходные характеристики транзистора BC546

MPS5172

Усилительный n - p - n транзистор общего назначения.

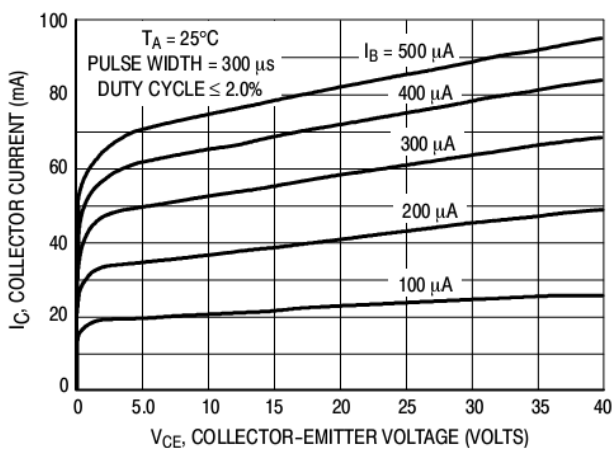


Рис. А.7 — Выходные характеристики транзистора MPS5172

BC636, BC638, BC640

Усилительные *p-n-p* транзисторы общего назначения.
Комплемментарные пары — BC635, BC637, BC639.

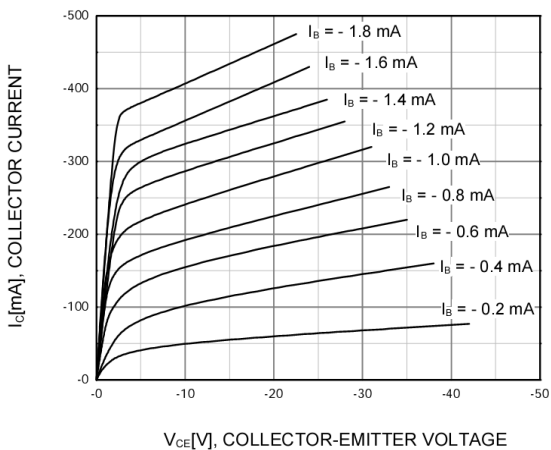


Рис. А.9 — Выходные характеристики транзистора BC636

BU406

Высокочастотный *n-p-n* транзистор большой мощности.

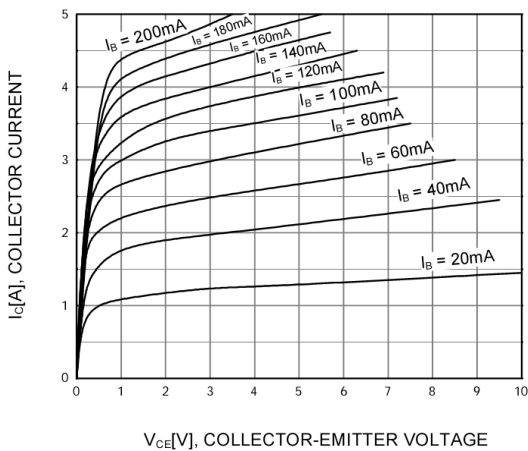


Рис. А.11 — Выходные характеристики транзистора BU406

2SB857, 2SB858

Высокочастотный $p-n-p$ транзистор большой мощности.
Комплиментарная пара к транзистору 2SD1133, 2SD1134

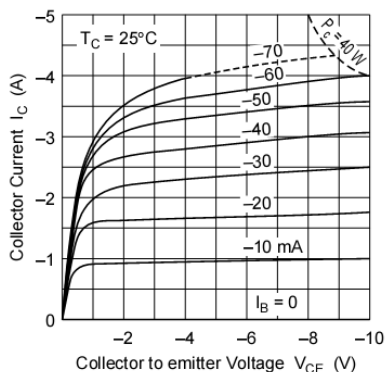


Рис. А.13 — Выходные характеристики транзисторов 2SD1133 и 2SD1134

KTD998

Транзистор $n-p-n$ большой мощности.
Комплиментарная пара к транзистору KTB778

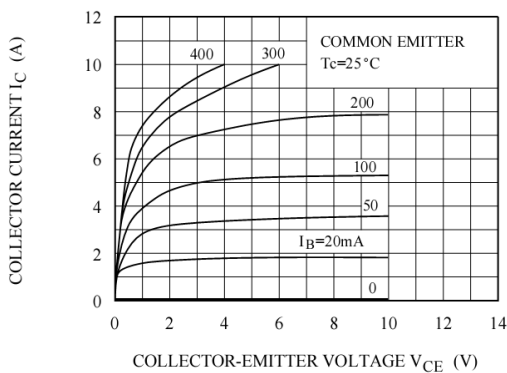


Рис. А.15 — Выходные характеристики транзистора KTD998

Заказ №

от

Тираж

экз.

Изд-во СевНТУ