

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Балаковский инженерно-технологический институт –
филиал НИЯУ МИФИ

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Методические указания к выполнению контрольных работ
по дисциплине «Электроника»
для студентов направления подготовки
«Электроэнергетика и электротехника»
всех форм обучения

Одобрено
редакционно-издательским советом
Балаковского инженерно-технологического
института

Балаково 2023

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по курсу «Электроника» предназначены для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» заочной формы обучения. Указания включают задания к контрольной работе по курсу «Электроника», краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения работы, пример ее выполнения и справочный материал. В рамках контрольной работы выполняется расчет каскада усилителя низкой частоты. Содержание заданий контрольной работы соответствует образовательным стандартам и рабочим программам.

Методические указания могут быть использованы при выполнении заданий на практических занятиях, при выполнении самостоятельных и расчетно-графических работ по одноименным курсам студентами очной формы обучения.

1. ВЫБОР ВАРИАНТА КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

Методические указания содержат 70 вариантов заданий. Номер задания выбирается по номеру в журнале. Нумерация второй группы начинается с варианта, следующего за последним вариантом первой группы.

Приступать к выполнению контрольной работы необходимо после изучения теоретического материала по рекомендованной литературе. В настоящей методичке приведен минимум необходимой информации, который не охватывает всего объема курса. При выполнении работы необходимо пользоваться справочниками при выборе транзисторов и иных элементов схемы усилителя.

Методические указания содержат пример расчета усилителя низкой частоты (УНЧ), который определяет общий алгоритм расчета для всех вариантов. Приведенный пример базируется на краткой теории методических указаний и жестко к ним привязан обозначениями на схеме. При выполнении работы допускается то же позиционное обозначение элементов схемы или присвоение позиционных номеров по правилу стандартов «сверху

вниз» и «слева направо».

2. ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Выполнить расчет каскада усилителя напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером и термостабилизацией в цепи эмиттера. Данные для расчета приведены в таблице 1, а параметры некоторых транзисторов в приложении к методическим указаниям.

Таблица 1

Таблица вариантов задания

№ варианта	U _{ВЫХ} МАХ, В (UmH)	R _H , Ом	fH, Гц	ЕПИТ, В
1	3,0	600	100	12
2	2,0	400	90	16
3	1,0	250	120	9
4	8,0	350	150	12
5	2,4	600	180	10
6	3,4	550	140	12
7	1,6	280	160	9
8	4,0	590	170	17
9	2,2	440	110	9
10	5,0	450	200	27
11	3,4	600	150	12
12	1,5	200	60	6
13	1,7	250	70	8
14	1,8	300	80	9
15	2,0	350	90	12
16	2,1	400	120	15
17	2,3	450	140	18
18	2,5	480	150	24
19	2,7	500	160	27
20	2,8	520	170	24
21	3,0	540	180	20
22	3,1	550	200	18
23	3,2	580	220	15
24	3,5	560	230	12
25	3,6	480	250	9
26	1,8	320	270	6
27	3,0	600	300	15
28	4,0	500	200	12

Продолжение таблицы 1

№ варианта	UBVIX MAX, В (UmH)	RH, Ом	fH, Гц	ЕПИТ, В
29	5,0	520	250	10
30	6,5	640	280	18
31	2,5	480	300	16
32	4,5	350	230	15
33	5,0	450	270	20
34	5,0	430	350	24
35	6,0	420	250	18
36	6,0	560	150	24
37	5,5	480	170	27
38	4,0	550	190	15
39	4,0	450	200	18
40	2,5	350	220	10
41	3,0	420	230	12
42	2,0	320	250	9
43	2,5	400	270	15
44	3,5	480	220	12
45	4,5	520	210	19
46	5,0	590	200	15
47	3,0	270	90	20
48	4,0	340	150	24
49	2,0	250	170	12
50	6,0	500	250	20
51	10	20	50	30
52	12	25	60	27
53	12	30	40	32
54	15	25	50	40
55	14	20	100	32
56	18	25	70	48
57	20	30	90	50
58	8	10	40	22
59	16	20	20	36
60	11	550	230	32
61	3,4	580	250	40
62	1,5	560	270	32
63	1,7	480	220	48
64	1,8	320	210	50
65	2,0	600	200	22
66	2,1	500	90	36
67	2,3	520	150	36

№ варианта	UBYX MAX, В (UmH)	RH, Ом	fH, Гц	ЕПИТ, В
68	2,5	640	170	30
69	2,7	480	250	27
70	2,8	350	100	32

3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

В рамках контрольной работы выполняется расчет каскада усилителя напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе. Расчет выполняется для схемы с общим эмиттером с заданием рабочей точки фиксированным напряжением на базе и резистором в цепи эмиттера. Работа предполагает выполнение выбора типа транзистора по справочнику, расчет всех элементов схемы, графические иллюстрации работы усилительного каскада на основе вольт-амперных характеристик.

Оформление контрольной работы начинается с варианта задания. Далее приводится схема каскада УНЧ, выполненная по правилам ЕСКД, обосновывается выбор конкретного транзистора, выписываются из справочника все его параметры, необходимые для расчета и выполняются копии вольт-амперных характеристик, которые масштабируются до удобных размеров. На вольт-амперных характеристиках строится нагрузочная прямая, выполняется выбор рабочей точки и расчет всех элементов каскада.

Контрольная работа выполняется на стандартных листах белой бумаги формата А4 в машинописном варианте объемом не более 20 страниц. В конце контрольной работы следует оставить 1 чистый лист для рекомендаций и исправлений преподавателя. Текст должен быть исполнен на одной стороне листа с использованием текстового редактора (Microsoft Word, OpenOffice), шрифт – «Times New Roman», размер шрифта – пт14, межстрочный интервал – полуторный, размеры полей: левое поле – 30 мм, правое поле – 10 мм, верхнее поле – 20 мм, нижнее поле – 20 мм. Текст по-

яснений контрольной работы должен содержать ссылки на источники информации. Контрольная работа сдается в деканат или на кафедру и проверяется преподавателем. Если работа не зачтена, то она отдается студенту на исправление замечаний. Без выполненной контрольной работы студенты не допускаются к экзамену. Исправленная контрольная работа сдается на кафедру для повторной проверки исправлений.

4. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Цель работы: изучить методику расчета и выполнить графоаналитический расчет усилителя низкой частоты по варианту задания.

Назначение усилителей. Электронные устройства состоят из совокупности взаимодействующих функциональных узлов. Их взаимодействие осуществляется посредством импульсов напряжения и тока, называемых электрическими сигналами.

Часть узлов выполняет функцию передачи воздействия от устройства на рабочий механизм промышленного оборудования и называется исполнительным элементом (электродвигатель, электромагнит, магнитный пускатель, динамик). Исполнительные элементы требуют для срабатывания напряжений в десятки и сотни вольт при токах от единиц ампер до десятков ампер. Формирование таких сигналов в электронных устройствах выполняется по информации первичных преобразователей (датчиков), которые являются источниками слабых сигналов с уровнями напряжения микро- и милливольты при токах микро- и миллиамперы (фотодиод, угломер, измеритель расстояния, микрофон). Очевидно, исполнительные элементы не могут срабатывать от первичных преобразователей. Слабые сигналы необходимо усилить. Электронное устройство, выполняющее функцию усиления слабых электрических сигналов, называется электронным усилителем.

Существует большое разнообразие электронных усилителей. По физическому параметру усиливаемого сигнала усилители делятся на: усилители напряжения, усилители тока, усилители мощности.

По диапазону частот усиливаемых сигналов усилители делятся на: усилители низкой частоты (УНЧ), усилители высокой частоты (УВЧ), усилители промежуточной частоты (УПЧ), усилители сверхвысокой частоты (УСВЧ), усилители постоянного тока (УПТ) или усилители медленно меняющихся сигналов.

По типу нагрузки они делятся на: резистивные, резонансные.

По виду усилительных элементов усилители делятся на: ламповые, полупроводниковые.

Усилительный каскад это минимальный функциональный блок, обеспечивающий усиление сигнала. Обычно в его состав входят один или несколько усилительных элементов, цепи обратной связи, элементы обеспечивающие режим по постоянному току, и так далее.

Далее кратко рассматриваются полупроводниковые усилители низкой частоты с резистивной нагрузкой.

4.1 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСИЛИТЕЛЯ. НАГРУЗОЧНАЯ ПРЯМАЯ

Пусть в цепь исполнительного элемента с сопротивлением R_H включен потенциометр по схеме реостата с сопротивлением R_P (рис. 1а).

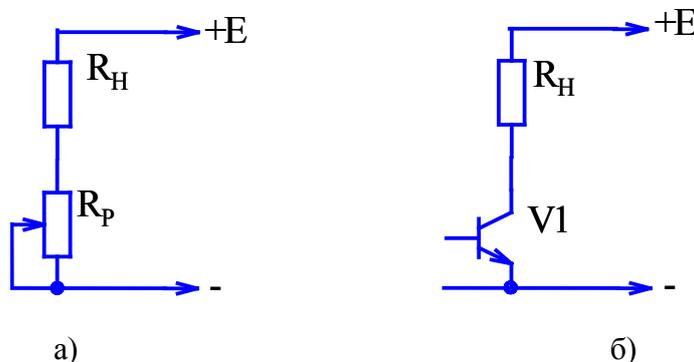


Рис. 1. Принцип действия усилителя

Если перемещать движок реостата R_P , то изменяется его сопротивление, сопротивление всей цепи $R_H + R_P$ и ток в цепи

$$I = \frac{E}{R_i + R_D} \quad (1)$$

По закону Ома изменится напряжение на нагрузке:

$$U_i = I \cdot R_i = \frac{E}{R_i + R_D} \cdot R_i \quad (2)$$

Согласно (2), напряжение $U_H = f(R_P)$, то есть напряжение на нагрузке можно регулировать реостатом R_P . Если сопротивление реостата изменять по гармоническому закону, то это изменение будет проявляться в изменении напряжения на нагрузке, а значит, будет управляться мощность, потребляемая нагрузкой от источника E .

Реостат в схеме рисунка 1а заменим на транзистор (см. рис. 1б). Напряжение база-эмиттер $U_{БЭ}$ будем изменять, тогда сопротивление участка эмиттер-коллектор транзистора будет изменяться подобно изменению сопротивления реостата R_P . Таким образом, транзистор в цепи выполняет функцию управляемого сопротивления, поведение схемы рисунка 1а будет соответствовать поведению схемы рисунка 1б. Транзистор посредством входного напряжения будет управлять поступлением мощности от источника в нагрузку. Разница в том, что в первом случае управление происходит посредством механического воздействия, а во втором случае электрическим сигналом малого напряжения и мощности.

Транзистор $V1$ и резистор R_H в схеме включены последовательно, поэтому $E = U_{ЭК} + U_{RH}$. По закону Ома $U_{RH} = I_K \cdot R_H$, тогда $E = U_{ЭК} + I_K \cdot R_H$. (3)

Решая относительно тока I_K , получим

$$I_K = -\frac{1}{R_H} \cdot U_{ЭК} + \frac{E}{R_H} \quad (4)$$

Так как величины E и R_H являются постоянными, то ток коллектора I_K , равный току нагрузки, зависит только от напряжения $U_{ЭК}$, то есть $I_K = f(U_{ЭК})$.

Если обозначить $\frac{1}{R_H} = k$, а отношение $\frac{E}{R_H} = b$, то $I_K = -k \cdot U_{ЭК} + b$ (5).

Выражение (5) совпадает с уравнением прямой $y = k \cdot x + b$, следовательно, выражение (4) соответствует прямой линии в координатах $U_{ЭК}$ и I_K . Прямую $I_K = f(U_{ЭК})$ построим по двум точкам. При $U_{ЭК} = 0$ ток $I_K = \frac{E}{R_H}$, а при $I_K = 0$ напряжение $U_{ЭК} = E$. Прямая, построенная по этим точкам, показана на рисунке 2 и называется нагрузочной.

Для произвольной точки А на прямой рисунок 2 показывает распределение всей ЭДС (то есть E) на два напряжения: $U_{ЭК}$ и U_{RH} . Если ток коллектора I_K будет изменяться, то точка А будет перемещаться по нагрузочной прямой и при этом напряжение будет перераспределяться между нагрузкой и транзистором. Таким образом, схема на рисунке 1 б позволяет управлять напряжением на нагрузке в цепи мощного источника E изменением напряжения $U_{ЭБ}$ маломощного источника во входной цепи.

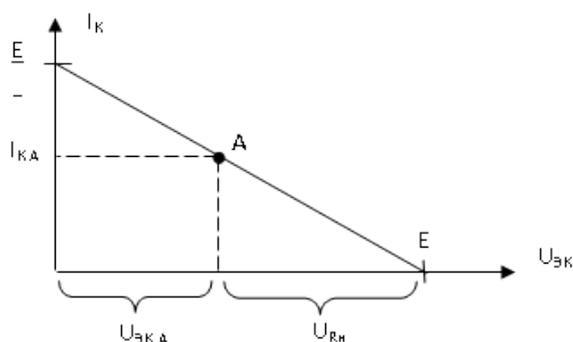


Рис. 2. Нагрузочная прямая усилителя на транзисторе

Эффект усиления можно проиллюстрировать графически на основе наложения нагрузочной прямой на выходные вольт-амперные характеристики, которые анализируются в комплексе со входными (рис. 3). Входные и выходные характеристики на рисунке 3 построены так, что ток базы на них имеет одинаковый масштаб. Процессы рассматриваются во времени, поэтому каждая из характеристик внизу дополнена вспомогательным графиком с осью времени. На левом дополнительном графике показано, что на интервале $0-t_1$ напряжение на входе $U_{ЭБ}$ остается постоянным $U_{ЭБ0}$, поэтому ток I_K и напряжение $U_{ЭК}$ на выходе также постоянны и обозначены I_{K0} и $U_{ЭК0}$. В момент времени t_1 на вход транзистора подается синусоидальный сигнал $U_{m ВХ}$

с амплитудой 0,05 В. Пунктирные линии на рисунке позволяют перейти от входной характеристики к выходным, на которых видно, что выходное напряжение изменяется по синусоидальному закону с амплитудой $U_{m \text{ Вых}} = 5$ В. Очевидно, что выходное напряжение сигнала превышает входное в 100 раз, следовательно, коэффициент усиления k усилителя равен 100.

4.2 ПОНЯТИЕ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ. КЛАССЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

Постоянную составляющую напряжения $U_{ЭБ0}$ на входе уменьшим и все построения повторим на рисунке 4 при неизменной амплитуде входного сигнала $U_{m \text{ ВХ}}$. Процессы на рисунках 3 и 4 сравним между собой.

Из сравнения следует, что на рисунке 3 синусоидальный сигнал на входе остается синусоидальным на выходе, а на рисунке 4 синусоидальный входной сигнал на выходе становится не синусоидальным.

Таким образом, один и тот усилитель работает не одинаково, работа отличается искажением сигнала. По условиям анализа разница обусловлена изменением постоянной составляющей напряжения $U_{ЭБ0}$ на входе. При отсутствии входного сигнала ($U_{m \text{ ВХ}} = 0$) усилителю соответствует набор постоянных значений напряжений и токов ($U_{ЭБ0}$, $U_{ЭК0}$, $I_{К0}$, $I_{Б0}$), который называется режимом усилителя по постоянному току или режимом покоя. Такому набору параметров соответствует определенная точка «А» на входной характеристике и точка «А'» на нагрузочной прямой. При изменении режима точка «А» смещается на входной характеристике, смещение вызвано изменением напряжения $U_{ЭБ0}$, которое называется напряжением смещения $U_{СМ}$, а соответствующий ему постоянный ток на входе током смещения $I_{СМ}$. Задать режим усилителя - это значит задать рабочую точку(РТ) и соответствующее напряжение смещения $U_{СМ}$. Рисунку 3 соответствует расположение рабочей точки на середине линейного участка входной характеристики и на середине нагрузочной прямой на выходных характеристиках.

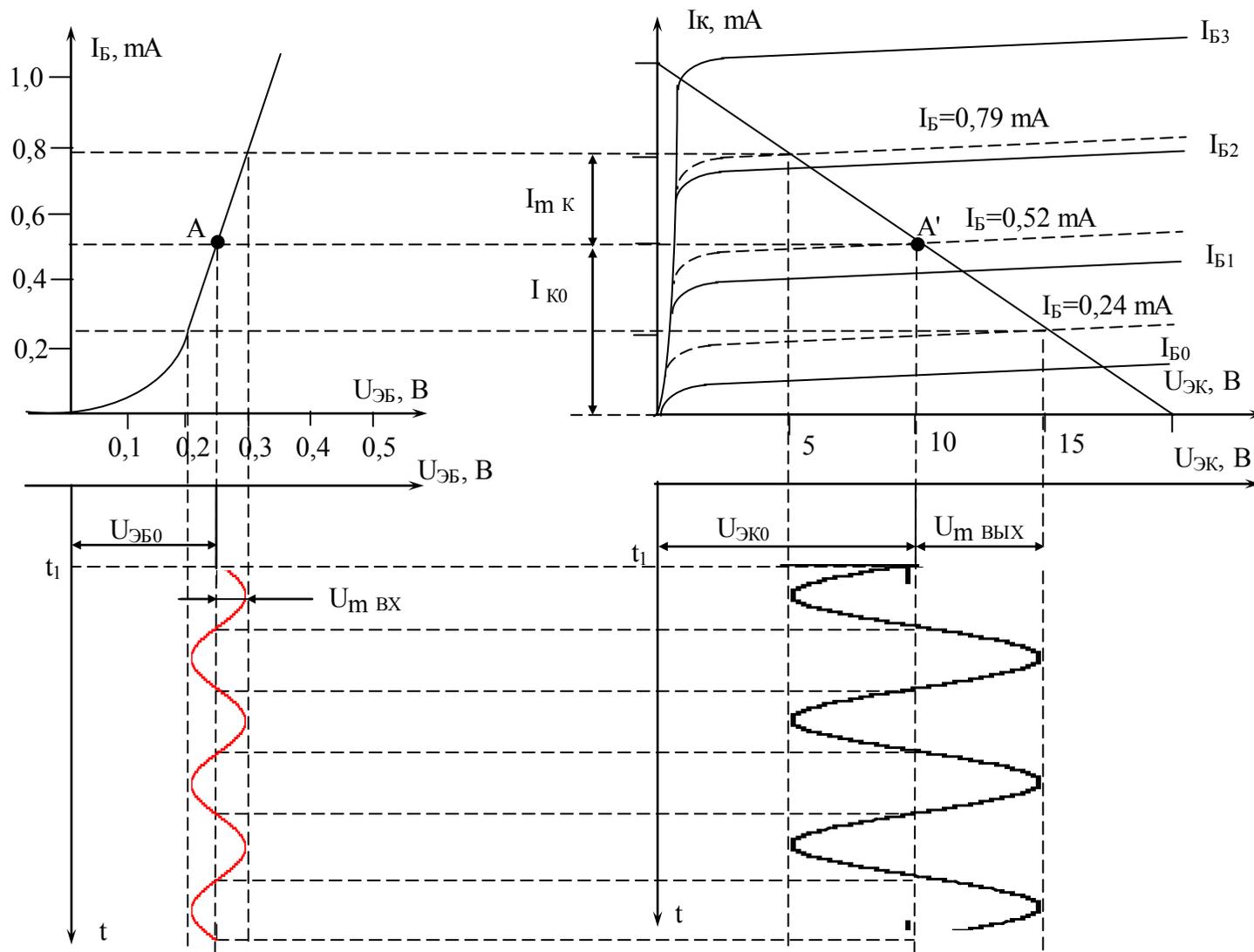


Рис. 3. Иллюстрация линейного усиления на основе вольт-амперных характеристик

Усилитель работает без искажений, его режим является линейным и называется режимом «А» или классом «А». В этом режиме амплитуда выходного напряжения $U_{m\text{ Вых}}$ и тока $I_{m\text{ Вых}}$ не должна превышать уровень постоянной составляющей, то есть $U_{m\text{ Вых}} < U_{ЭБ0}$ и $I_{m\text{ Вых}} < I_{К0}$. В классе «А» ток выходной цепи I_K соответствует рисунку 5 а.

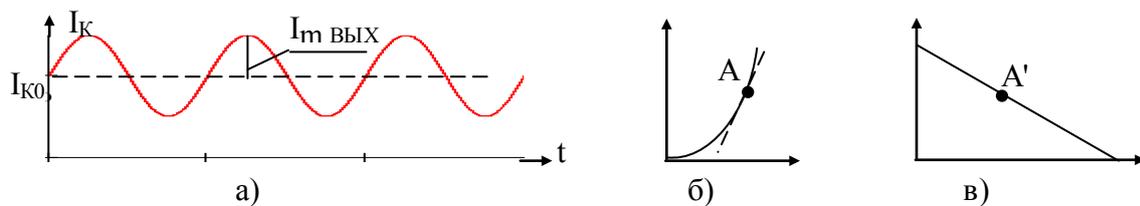


Рис. 5. Признаки усилителя класса «А»: а – форма выходного тока; б - расположение РТ на входной характеристике; в - расположение РТ на нагрузочной прямой

Рисунку 4 соответствует смещение рабочей точки в область малых токов и искажение входного сигнала. Искажение тем сильнее, чем ближе рабочая точка к началу координат входной характеристики. Если она совпадает с началом координат, то усилителю соответствует класс «В». Его особенности иллюстрируются рисунком 6.

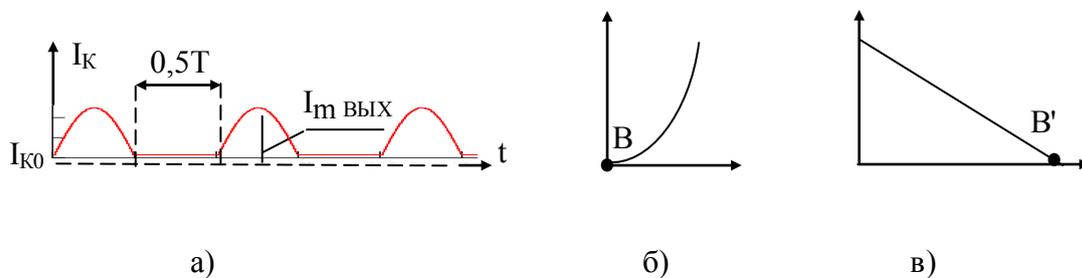


Рис. 6. Признаки усилителя класса «В»: а – форма выходного тока; б - расположение РТ на входной характеристике; в - расположение РТ на нагрузочной прямой

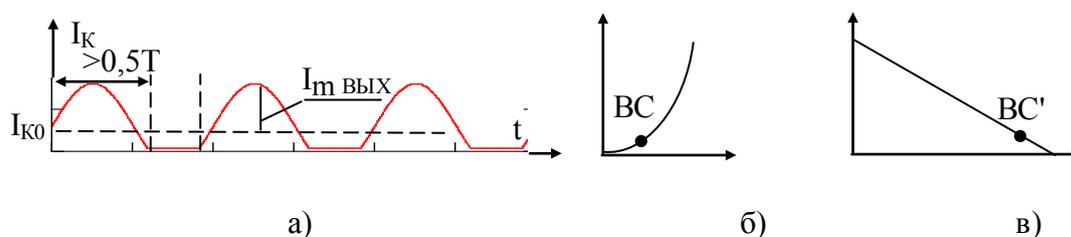


Рис. 7. Признаки усилителя класса «BC»: а – форма выходного тока; б - расположение РТ на входной характеристике; в - расположение РТ на нагрузочной прямой

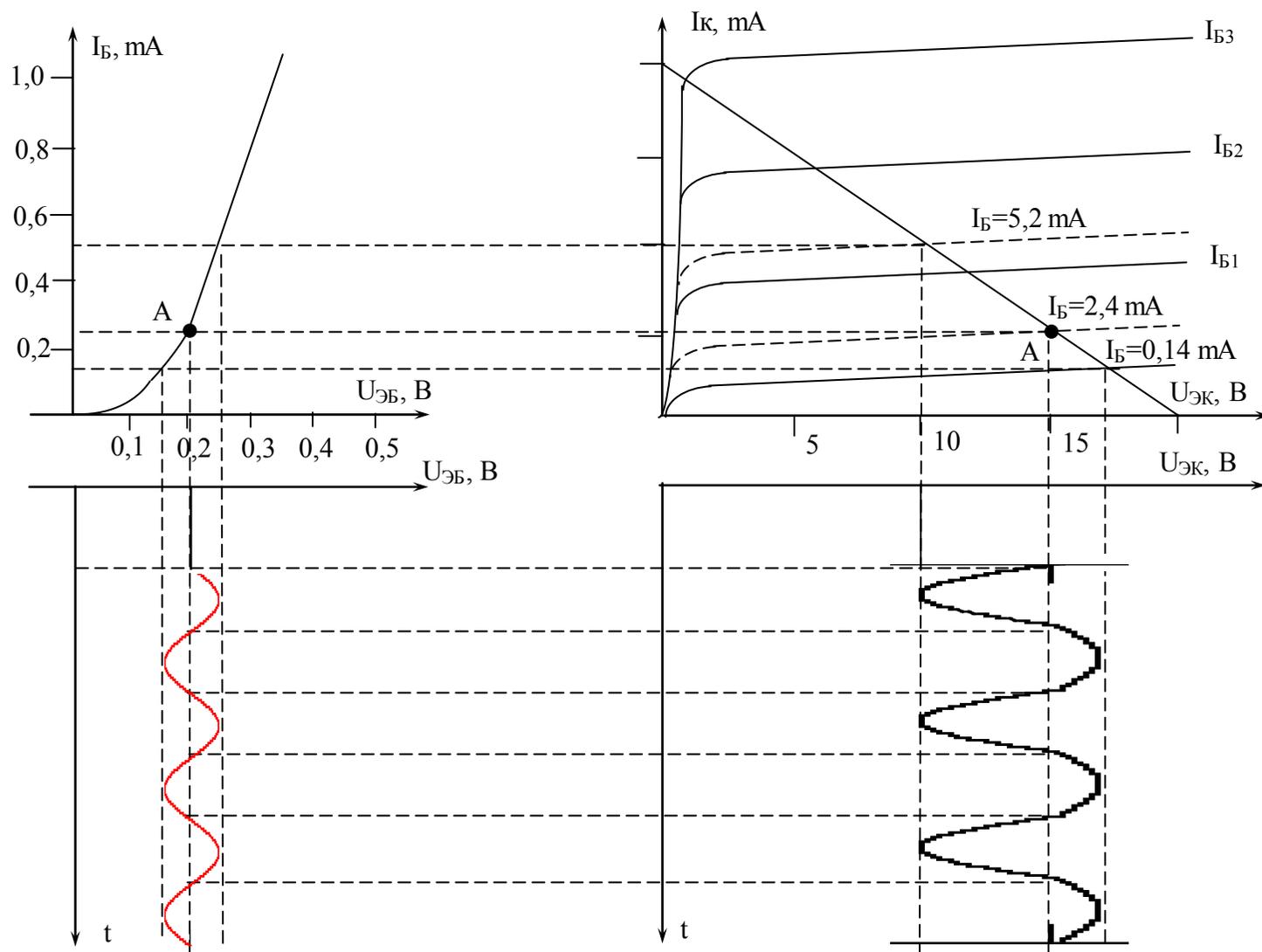


Рис. 4. Иллюстрация нелинейного искажения сигнала транзисторным усилителем на основе вольт-амперных характеристик

Для класса «В» характерно «срезание» половины синусоиды. При отсутствии входного сигнала тока в выходной цепи нет, поэтому режим является экономичным. Часто применяется класс «АВ», для которого рабочая точка расположена в области малых токов (рис. 7) и длительность импульса выходного тока чуть больше половины периода.

Принято режим усилителя характеризовать углом отсечки сигнала θ . Углом отсечки θ называют половину длительности токового импульса в выходной цепи, выраженной в радианной мере. Для режима «А» угол отсечки $\theta = \pi$, для режима «В» $\theta = \pi/2$, для режима «ВС» $\pi/2 < \theta < \pi$. Все три режима используются в аналоговой электронике.

В цифровой электронике применяют режимы «С» и «D». Для режима «С» угол отсечки $\theta < \pi/2$, а для режима «D» $\theta < 10^\circ$.

4.3 СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Выше обосновано, что характер работы усилителя определяется выбором рабочей точки, которая задается постоянными значениями напряжения $U_{ЭБ0}$ и тока $I_{Б0}$ на входе транзистора. Для задания этих параметров между эмиттером и базой необходимо включить источник смещения E_B (рис. 8). Таким образом, усилителю требуется два источника: E_K и E_B .

Электронное устройство может содержать десятки, сотни транзисторов, каждый из которых требует два источника. Практически это неудобно и не экономично, поэтому применяются способы получения напряжения покоя $U_{ЭБ0}$ от источника коллекторного питания E_K .

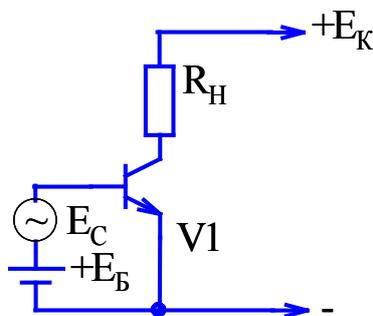


Рис. 8. Схема усилителя с источником E_B задания рабочей точки

Способ задания рабочей точки фиксированным напряжением на базе основан на использовании делителя напряжения на резисторах R1 и R2, которые включаются последовательно в цепь коллекторного источника E_K (рис. 9а).

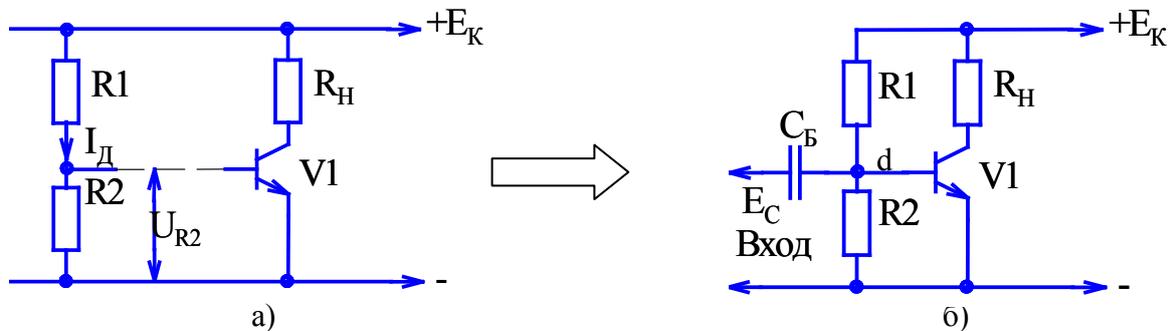


Рис. 9. Включение делителя в цепь питания транзистора (а) и схема усилителя с заданием рабочей точки фиксированным напряжением с помощью делителя (б)

По цепи делителя протекает ток

$$I_D = \frac{E_K}{R1 + R2} , \quad (6)$$

тогда напряжение на резисторе R2

$$U_{R2} = I_D \cdot R2 = \frac{E_K}{R1 + R2} \cdot R2 = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot E_K . \quad (7)$$

Резисторы R1 и R2 можно выбрать так, чтобы напряжение покоя $U_{ЭБ0}$ было равно U_{R2} , то есть

$$U_{ЭБ0} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot E_K . \quad (8)$$

На этом основании выход делителя соединяется со входом усилителя по пунктирной линии и получается схема рисунка 9 б.

В уравнении (8) два неизвестных: R1 и R2. Для их расчета учитывают, что напряжение смещения $U_{ЭБ0}$ должно оставаться постоянным, вход транзистора должен шунтировать делитель. Это возможно, если ток делителя I_D много больше тока покоя транзистора $I_{Б0}$. Практически достаточно выполне-

ния условия $I_D = (5 - 10) I_{Б0}$ или $\frac{E_K}{R1 + R2} = (5 - 10) I_{Б0} . \quad (9)$

Уравнения (8) и (9) объединяют в систему и по выбранной рабочей точке ($U_{ЭБ0}$, $I_{Б0}$) вычисляют неизвестные R_1 и R_2 . В точку «d» каскада требуется подать напряжение сигнала. Если внешний источник сигнала E_C подключить параллельно R_2 , то он будет шунтировать резистор своим внутренним сопротивлением и, тем самым, смещать рабочую точку. Для исключения влияния на рабочую точку источник сигнала E_C , подключается через разделительный конденсатор C_B . Его емкость выбирается так, чтобы сопротивление конденсатора X_C было много меньше входного сопротивления каскада (или транзистора) по переменному току. Обычно конденсатор выбирают из условия: $X_C \leq 0,1 \cdot r_{BX}$,

$$\text{откуда } \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot C_B} \leq 0,1 \cdot r_{BX} \text{ и } C_B \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot r_{BX}} \quad (10)$$

Задание рабочей точки фиксированным током базы. Рабочей точке на входной характеристике соответствуют два параметра, поэтому режим покоя можно задавать не только напряжением $U_{ЭБ0}$, но и током базы $I_{Б0}$. Для этого исходную схему усилителя на рисунке 1 дополняют резистором R_B , который подключается к источнику E_K (рис. 10а).

$$\text{По резистору протекает ток } I_{RB} = \frac{E_K}{R_B}. \quad (11)$$

Резистор R_B можно выбрать так, чтобы ток резистора I_{RB} был равен току покоя транзистора $I_{Б0}$. Тогда режим покоя транзистора можно задать переносом нижнего вывода резистора по направлению стрелки на рис. 10а и в результате получить схему рис. 10 б. При таком переносе условие (11) несколько нарушится, так как на резистор будет приходиться напряжение на величину $U_{ЭБ0}$ меньше. Тогда ток базы

$$I_{RB} = \frac{E_K - U_{ЭБ0}}{R_B}. \quad (12)$$

Резистор R_B можно выбрать так, чтобы $I_{Б0} = I_{RB}$, то есть

$$I_{Б0} = \frac{E_K - U_{ЭБ0}}{R_B}. \quad (13)$$

Так как $U_{ЭБ0} \ll E_K$, то результаты выражений (11) и (13) почти совпадают.

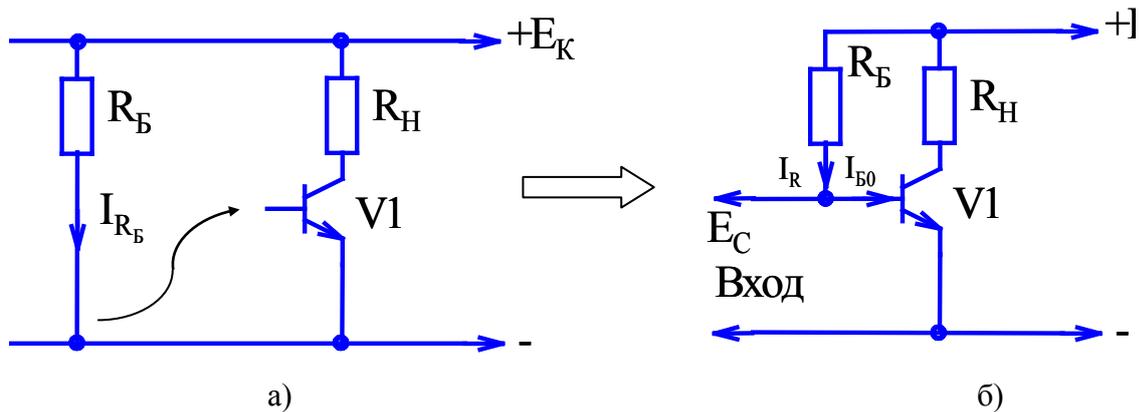


Рис. 10. Включение резистора задания тока в цепь питания транзистора (а) и схема усилителя с заданием рабочей точки фиксированным током базы (б)

4.4 ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

В процессе работы усилителя его активный элемент нагревается, температура транзистора повышается. Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры, у транзистора при нагревании возрастает обратный ток коллектора и становится соизмеримым с основным током. Это приводит к нарушению режима, к смещению рабочей точки за допустимые границы. Для сохранения режима и качества усиления применяется термостабилизация рабочей точки. Основных способов термостабилизации рабочей точки усилителя два: эмиттерная и коллекторная.

Эмиттерная термостабилизация применяется при включении транзистора по схеме с ОЭ и заключается в том, что в цепь эмиттера включается резистор $R_Э$, называемый эмиттерным (рис. 11).

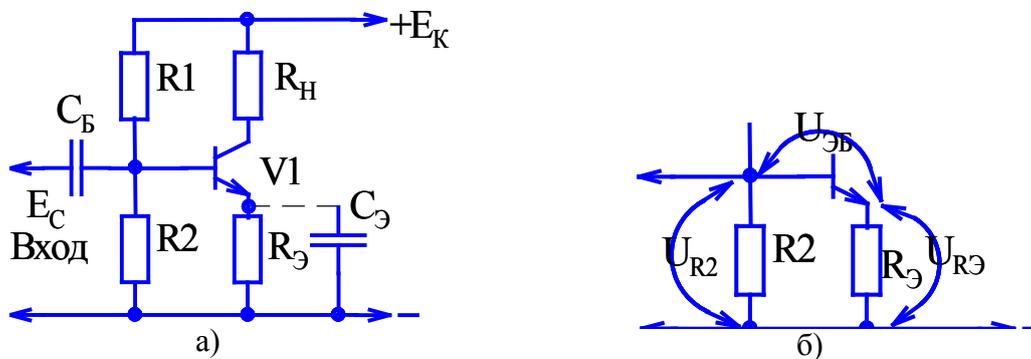


Рис. 11. Схема усилителя с эмиттерной термостабилизацией (а), фрагмент схемы для анализа напряжений (б)

В схеме резистор R_2 включен параллельно участку цепи, содержащему эмиттерный переход и резистор $R_Э$ (рис. 11б), поэтому

$$U_{R_2} = U_{ЭБ} + U_{R_Э}, \text{ отсюда } U_{ЭБ} = U_{R_2} - U_{R_Э}. \quad (14)$$

Напряжение U_{R_2} есть напряжение смещения $U_{ЭБ0} = \text{const}$ в уравнении (13), а напряжение $U_{R_Э} = I_K \cdot R_Э$ растет в результате роста тока I_K при нагревании [$I_K = f(t^\circ)$]. Следовательно, напряжение $U_{ЭБ}$ уменьшается, рабочая точка на входе транзистора автоматически смещается вниз, а коллекторный ток I_K уменьшается до прежнего значения.

Практика показала приемлемые результаты термостабилизации усилителя при выполнении условия $R_Э \approx (0,1 \div 0,2) \cdot R_H$. (15)

Резистор $R_Э$ образует отрицательную обратную связь каскада, повышающую качество усиления, но снижающую коэффициент усиления. Когда отрицательная обратная связь не требуется, резистор шунтируется конденсатором $C_Э$. Его емкость выбирается по аналогии с конденсатором в цепи базы $C_Б$. Емкость конденсатора должна обеспечить его сопротивление значительно меньше сопротивления $R_Э$ и удовлетворять условию

$$C_Э \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot R_Э}, \quad (16)$$

где f_H – нижняя частота диапазона усиливаемого сигнала.

Коллекторная термостабилизация реализуется переносом верхнего вывода резистора задания рабочей точки базы непосредственно к коллектору транзистора (рис. 12).

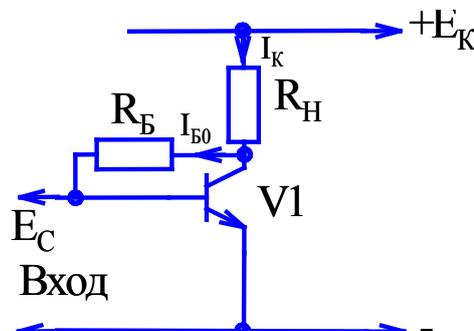


Рис. 12. Схема усилителя с коллекторной термостабилизацией

Резистор R_B в схеме включен параллельно транзистору, поэтому ток смещения $I_{B0} = \frac{U_{ЭК}}{R_B}$. Так как $U_{ЭК} = E_K - I_K \cdot R_H$, то $I_{B0} = \frac{E_K - I_K \cdot R_H}{R_B}$. (17)

С повышением температуры ток коллектора I_K растет, при этом, согласно (17), ток I_{B0} уменьшается, рабочая точка на входной характеристике смещается в область меньших токов. Это приводит к тому, что ток коллектора I_K уменьшается до прежних значений.

4.5 ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ КАСКАДА

Способы термостабилизации рабочей точки каскада рассмотрены качественно. В технических расчетах требуется количественная оценка эффективности тепловой стабильности, которая характеризуется коэффициентом нестабильности S . Температурная нестабильность связана с влиянием теплового (обратного) тока коллектора I_{Kt} на полный ток коллектора I_K , то есть с зависимостью $I_K = f(I_{Kt})$. Коэффициент нестабильности определяется соотношением

$$S = \frac{dI_K(I_{Kt})}{dI_{Kt}}. \quad (18)$$

Примечание. В справочной и учебной литературе обратный ток коллектора обозначается I_{K0} . В тексте методических указаний этим символом ранее обозначен ток покоя коллектора, поэтому обратный (тепловой) ток коллектора обозначен I_{Kt} (или I_{Kt}).

В схеме с ОЭ (см. рис. 11) $I_{Э} = I_K + I_B$ (19), то есть $I_K < I_{Э}$. Коллекторный ток I_K составляет часть тока эмиттера $I_{Э}$ или $I_K = \alpha \cdot I_{Э}$ (20), где α есть коэффициент передачи тока эмиттера транзистора. Выражение (19) справедливо, если не учитывать обратный ток коллектора. С учетом теплового тока

$$I_K = \alpha \cdot I_{Э} + I_{Kt}, \quad (21)$$

$$\text{откуда } I_{Э} = \frac{I_K - I_{Kt}}{\alpha}. \quad (22)$$

Из уравнения (19) $I_B = I_{Э} - I_K$, а с учетом (22) ток базы

$$I_B = \frac{I_K - I_{Kt}}{\alpha} - I_K = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot I_K - \frac{I_{Kt}}{\alpha}. \quad (23)$$

Для схемы включения с ОЭ (см. рис. 11) справедливы следующие уравнения:

$$\begin{cases} E = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 & \text{(уравнение цепи делителя);} \\ I_1 = I_2 + I_B & \text{(уравнение узла «делитель-база»);} \\ U_{R2} = U_{ЭБ} + U_{RЭ} & \text{(уравнение для рис. 11б).} \end{cases} \quad (24)$$

Из последнего уравнения $U_{R2} \approx U_{RЭ}$ (так как $U_{ЭБ} \ll U_{RЭ}$) или $I_2 \cdot R_2 = I_Э \cdot R_Э$ (25), следовательно, $I_2 = \frac{R_Э}{R_2} \cdot I_Э$. (26)

Подставляя (23), (26) и второе уравнение системы в первое получим:

$$E = (I_2 + I_B) \cdot R_1 + I_Э \cdot R_Э = \left(\frac{R_Э}{R_2} \cdot I_Э + I_Э - I_K \right) \cdot R_1 + I_Э \cdot R_Э$$

Поделив обе части равенства на R_1 и сгруппировав подобные члены, содержащие $I_Э$, получим:

$$\frac{E}{R_1} = I_Э \cdot \left(\frac{R_Э}{R_1} + \frac{R_Э}{R_2} + 1 \right) - I_K. \quad (27)$$

Выражение в скобках зависит от параметров схемы, определяющих рабочую точку и является некоторым варьируемым коэффициентом k . Заменяя в (27) значение $I_Э$ в соответствии с (22) получим

$$\frac{E}{R_1} = \frac{I_K - I_{Kt}}{\alpha} \cdot k - I_K,$$

и, решая относительно тока I_K , находим:

$$I_K = \frac{\alpha \cdot E}{R_1 \cdot (k - \alpha)} + \frac{k}{k - \alpha} \cdot I_{Kt}. \quad (28)$$

Уравнение (28) есть искомая зависимость $I_k = f(I_{Kt})$, в которой присутствует варьируемый коэффициент k . В соответствии с определением

крутизны (16)
$$S = \frac{dI_K(I_{Kt})}{dI_{Kt}} = \frac{k}{k - \alpha}. \quad (29)$$

Таким образом, температурная нестабильность каскада целиком определяется значением коэффициента k , а значит параметрами задания рабочей точки.

$$\text{Если } R_1 > R_2 \gg R_{\text{э}}, \text{ то } k \rightarrow 1 \text{ и тогда } S = S_{\text{max}} = \frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1,$$

где β – статический коэффициент передачи тока базы транзистора. В современной литературе он обозначается h_{21} и для большинства транзисторов имеет значение от нескольких десятков до нескольких сотен. Если R_1 и R_2 много меньше $R_{\text{э}}$, то $k \rightarrow \infty$ и тогда $S = S_{\text{min}} = 1$.

Практика показала, что усилительный каскад хорошо термостабилизирован при $S \leq 1,5 \div 2$, или $\frac{k}{k-\alpha} \leq 2$. Из неравенства следует $k \geq 2$. Согласно обозначению, коэффициент $k = \left(\frac{R_{\text{э}}}{R_1} + \frac{R_{\text{э}}}{R_2} + 1 \right) \geq 2$. В усилительном каскаде обычно $R_1 \gg R_2$, тогда, пренебрегая первым слагаемым, получим $\frac{R_{\text{э}}}{R_2} + 1 \geq 2$ и $\frac{R_{\text{э}}}{R_2} \geq 1$. (30)

Проведенный анализ показывает, что добиться хорошей тепловой стабилизации каскада можно правильным выбором элементов схемы. При этом возможны два подхода:

1. Увеличение сопротивления эмиттерного резистора $R_{\text{э}}$, с выполнением условий (28) и (14).

2. Уменьшение сопротивлений резисторов R_1 и R_2 базового делителя.

Второй подход был выявлен при обосновании способа задания рабочей точки фиксированным напряжением на базе, однако, выполнение условия (9) может привести к тому, что базовый делитель будет шунтировать источник сигнала. По этой причине первый подход является более предпочтительным.

Изложенные выше теоретические сведения не охватывают всего многообразия построения УНЧ. Каждый новый вариант усилителя требует творческого решения задачи. Далее приведен простой пример расчета усилительно-

го каскада.

5. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Рассчитать усилительный каскад напряжения по схеме с ОЭ (см. рис. 11) графоаналитическим методом, если:

- нагрузкой является входное сопротивление последующего каскада сопротивлением $R_H = 500 \text{ Ом}$;

- требуемое напряжение на нагрузке $U_{\text{ВЫХ МАХ}} = U_{\text{мН}} = 4 \text{ В}$;

- напряжение источника питания $E_{\text{ПИТ}} = 12 \text{ В}$;

- нижняя граница спектра частот усиливаемого сигнала $f_H = 20 \text{ Гц}$.

По результатам расчета выбрать по справочнику транзистор, построить графические иллюстрации работы каскада и рассчитать все элементы схемы.

1. Уточнение схемы включения

По условию нагрузка R_H является внешним элементом по отношению к каскаду, поэтому она подключается к нему через разделительный конденсатор C_P . При этом коллекторный резистор по схеме рис. 11 переобозначен символом R_K (рис. 13).

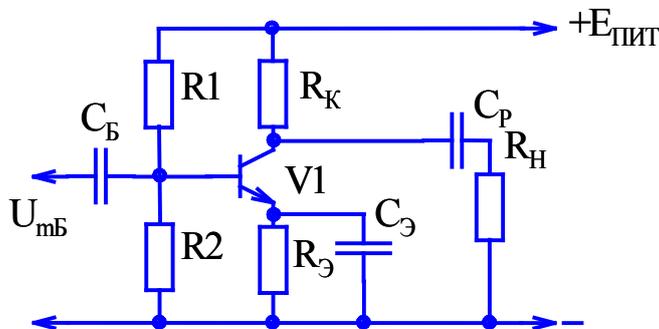


Рис. 13. Усилительный каскад с внешней нагрузкой R_H

2. Выбор транзистора

Любой транзистор характеризуется максимально допустимым напряжением между коллектором и эмиттером $U_{KЭ \text{ МАХ}}$. Напряжение источника питания 12 В. Для обеспечения надежности транзистор выбирается из условия $U_{KЭ \text{ МАХ}} > 1,2 \cdot E_{\text{ПИТ}} = 1,2 \cdot 12 \text{ В} = 14,4 \text{ В}$. Любой транзистор характеризуется максимально допустимым током коллектора $I_{K \text{ МАХ}}$. В режи-

ме класса «А» ток $I_{K\text{ MAX}}$ должен с запасом превышать удвоенную амплитуду усиленного сигнала в нагрузке I_{mH} (рис. 5), то есть $I_{K\text{ MAX}} > 2 \cdot I_{mH}$. Амплитуда тока в нагрузке: $I_{mH} = \frac{U_{mH}}{R_H} = \frac{4B}{500\text{ Ом}} = 0,008\text{ А} = 8\text{ мА}$, поэтому $I_{K\text{ MAX}} > 16\text{ мА}$.

По приложению 1 или справочнику [11] выбираем транзистор МП42А, для которого $I_{K\text{ MAX}} = 150\text{ мА} > 16\text{ мА}$ и $U_{KЭ\text{ MAX}} = 15\text{ В} > 14,4\text{ В}$, следовательно, транзистор удовлетворяет требованиям по допустимому току и напряжению. Выписываем значения других параметров: $P_{K\text{ MAX}} = 200\text{ мВт}$; $h_{21} = 30 \div 50$; $U_{KЭ\text{ НАС}} = 0,2\text{ В}$ при $I_K = 10\text{ мА}$. Копируем вольт-амперные характеристики [Приложение 2].

3. Выбор рабочей точки

Рабочая точка характеризуется параметрами покоя I_{K0} , $U_{ЭK0}$, $I_{Б0}$, $U_{ЭБ0}$. Напряжение покоя для режима «А» выбирается из условия $U_{ЭK0} = 0,5 \cdot E_K = 0,5 \cdot 12\text{ В} = 6\text{ В}$. Ток покоя $I_{K0} > 8\text{ мА}$, выбираем $I_{K0} = 9\text{ мА}$.

Нагрузочная прямая должна проходить через рабочую точку и точку $E_{ПИТ} = 12\text{ В}$, $I_K = 0$. По двум точкам прямая наносится на семейство выходных характеристик (см. рис. 14). По результатам построений рабочей точке соответствует входной ток покоя $I_{Б0} \approx 0,2\text{ мА}$, которому на входной характеристике соответствует напряжение покоя $U_{ЭБ0} \approx 0,22\text{ В}$. Входной ток покоя можно получить иначе, через значение h_{21} . Его среднее значение по справочнику имеет значение 40, поэтому

$$I_{Б0} = \frac{I_{K0}}{h_{21}} = \frac{9\text{ мА}}{40} = 0,22\text{ мА}.$$

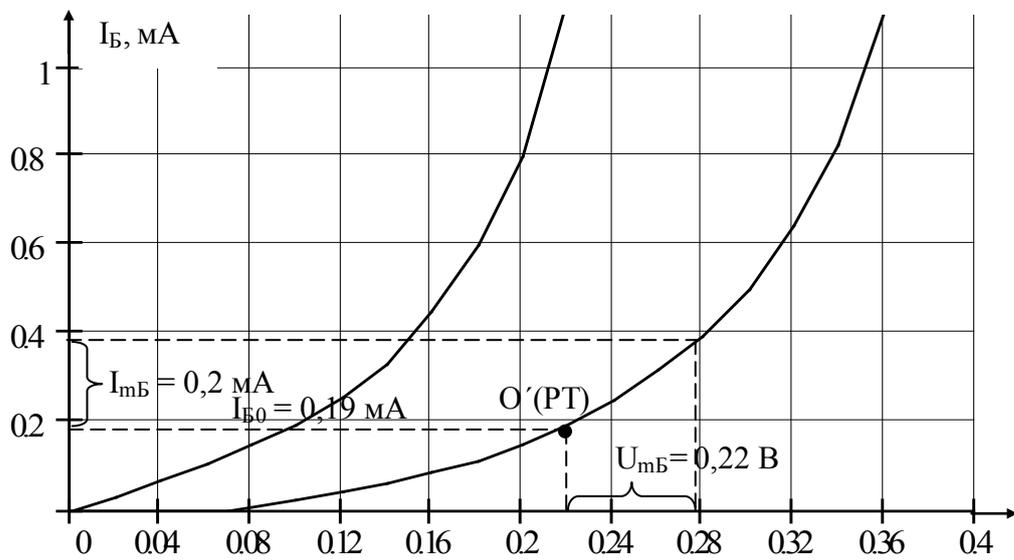
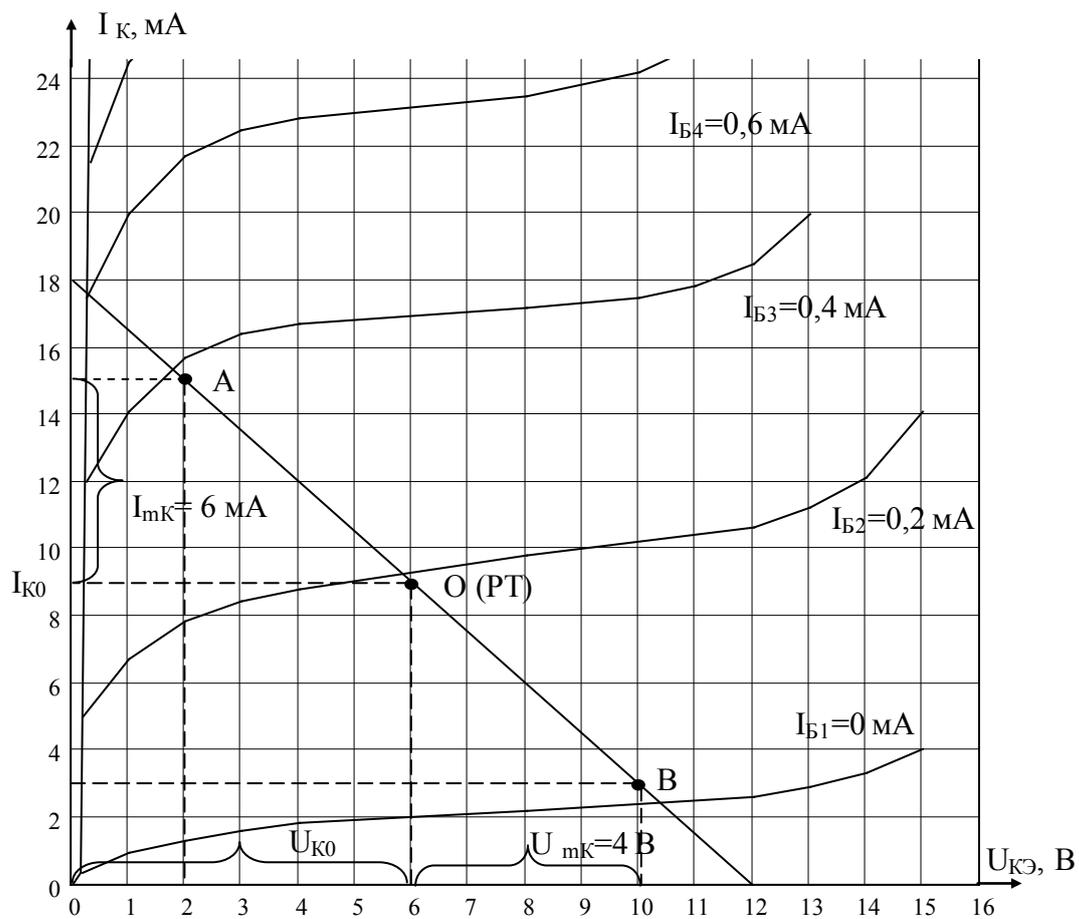


Рис. 14. Выходные и входные характеристики транзистора МП42

4. Расчет резисторов коллекторной цепи

Точке пересечения нагрузочной прямой с вертикальной осью на рисунке соответствует ток 18 мА, тогда полное сопротивление резисторов коллекторной цепи $R_K + R_{Э} = \frac{E_{ПИТ}}{I_K} = \frac{12 В}{18 мА} \approx 670 \text{ Ом}$. Согласно (14) $R_{Э} \approx 0,2R_K$, поэтому $R_K + R_{Э} = 1,2R_K = 670 \text{ Ом}$, откуда $R_K \approx 560 \text{ Ом}$, а $R_{Э} \approx 112 \text{ Ом}$. Полученные расчетные значения требуют уточнения при выборе типа резисторов. Выберем резисторы типа МЛТ. По номинальному ряду E24 ближайшее значение выпускаемых промышленностью резисторов 110 Ом ($R_{Э}$) и по ряду E12 сопротивлением 560 Ом (R_K) (см. ряды номинальных значений ёмкостей и сопротивлений).

В наиболее тяжелых условиях по резисторам протекает ток 18 мА, поэтому мощность коллекторного резистора $P_{R_K} = I^2 \cdot R_K = (18 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 560 \approx 0,18 \text{ Вт}$. Мощность эмиттерного резистора $P_{R_{Э}} = I^2 \cdot R_{Э} \approx 0,036 \text{ Вт}$. По номинальному ряду мощностей выбираем резистор R_K мощностью 0,25 Вт и резистор $R_{Э}$ мощностью 0,125 Вт.

5. Расчет резисторов цепи базового делителя

Согласно (28), хорошая термостабилизация каскада обеспечивается при условии $R_{Э} \geq R_2$. Выбираем для резистора R_2 ориентировочное значение 110 Ом и выполняем его уточнение расчетом.

При протекании тока делителя I_d по резистору R_2 напряжение $U_{R_2} = U_{ЭБ0} + U_{R_{Э}}$. В соответствии с (9) $I_d = (5 - 10) I_{Б0}$, выбираю коэффициент 5, тогда $U_{R_2} = 5 \cdot 0,19 \cdot 10^{-3} \cdot R_2$, $U_{R_{Э}} = I_{К0} \cdot R_{Э} = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 110 = 0,99 \text{ В}$. На основе этого $5 \cdot 0,19 \cdot 10^{-3} \cdot R_2 = 0,22 + 0,99$, откуда

$$R_2 = \frac{1,21 В}{0,95 \cdot 10^{-3} А} \approx 1274 \text{ Ом}.$$

Ближайшее значение по номинальному ряду E24 составляет 1300 Ом или 1,3 кОм (см. ряды номинальных значений ёмкостей и сопротивлений).

В точке «О» нагрузочной прямой ток базы $I_{Б0} \approx 0,19 \text{ мА}$, в точке «А»

$I_{BA} \approx 0,39$ мА (см. рис. 14). Амплитуда сигнала по току на базе $I_{mB} = \Delta I_B = 0,39 - 0,19 = 0,2$ мА. При переходе от точек «О» и «А» на выходных характеристиках к входным получаем амплитуду напряжения сигнала на входе $U_{mB} = 0,28 - 0,22 = 0,06$ В. Тогда входное сопротивление транзистора по

переменному току $r_{BX} = \frac{U_{mB}}{I_{mB}} = \frac{0,06 \text{ В}}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 300 \text{ Ом}$. В итоге сопротивление

R2 более чем в 4 раза превышает входное сопротивление транзистора, не шунтирует входной сигнал и может быть принято равным 1,3 кОм (предварительное значение 110 Ом можно не учитывать).

На резисторе R1 падает напряжение $U_{R1} = 12 - 1,21 \approx 10,8$ В и по нему протекает ток $I_{R2} + I_{B0} = 0,95 + 0,19 = 1,14$ мА, тогда

$$R1 = \frac{10,8 \text{ В}}{1,14 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 9,47 \text{ кОм}.$$

По ряду E48 ближайшее к расчетному значению сопротивление 9,53 кОм, но для практики вполне приемлемым является резистор сопротивлением 9,1 кОм по ряду E24.

Мощность резистора R2 составляет $P_{R2} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 1,21 \text{ В} \approx 1,15 \cdot 10^{-3}$ Вт, по номинальному ряду выбираем резистор мощностью 0,125 Вт.

Мощность резистора R1: $P_{R1} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 10,8 \text{ В} \approx 0,15$ Вт, по номинальному ряду выбираем резистор мощностью 0,25 Вт.

Емкость разделительного конденсатора C_B в цепи базы (10):

$$C_B \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot r_{BX}} = \frac{10}{2\pi \cdot 20 \text{ Гц} \cdot 300 \text{ Ом}} \approx 265 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Емкость разделительного конденсатора C_E в цепи эмиттера (16):

$$C_E \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot R_E} = \frac{10}{2\pi \cdot 20 \text{ Гц} \cdot 110 \text{ Ом}} \approx 723 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Аналогично

$$C_P \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot R_H} = \frac{10}{2\pi \cdot 20 \text{ Гц} \cdot 500 \text{ Ом}} \approx 159 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Такой емкостью обладают электролитические конденсаторы. По справочнику выбираем их тип, например, конденсаторы К50-16. Ближайшие значения емкостей: для входного C_B и разделительного C_P конденсаторов 200 мкФ, а для эмиттерного 500 мкФ (см. ряды номинальных значений ёмкостей и сопротивлений). По расчетам напряжение в цепи базы не превышает 1,21 В, а в цепи эмиттерного резистора 0,99 В. На этом основании конденсаторы можно выбрать на рабочее напряжение 6,3 В. По рисунку 14 напряжение на коллекторе может достигать 10 В, поэтому, для обеспечения надежности, конденсатор C_P выбираем из выпускаемых на напряжение 16 В.

6. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов О. А. Электроника: учебное пособие / О. А. Соколов, П. С. Назаров, Д. О. Соколов. — Санкт-Петербург : СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, 2022. — 178 с. — ISBN 978-5-907354-16-6. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/292352> (дата обращения: 17.04.2023)

2. Электроника: учебное пособие / составители Н. А. Климов, А. С. Яблоков. — пос. Караваяво: КГСХА, 2021. — 116 с. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/251993> (дата обращения: 17.04.2023)

3. Расчет элементов электронных схем : учебное пособие / В. В. Харламов, Р. В. Сергеев, П. К. Шкодун, Л. Е. Серкова. — 2-е изд., с изм. — Омск: ОмГУПС, 2019. — 79 с. — ISBN 978-5-949-41247-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/165714> (дата обращения: 17.04.2023)

4. Легостаев Н. С. Методы анализа и расчета электронных схем : учебное пособие / Н. С. Легостаев. — Москва: ТУСУР, 2014. — 237 с. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL:

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

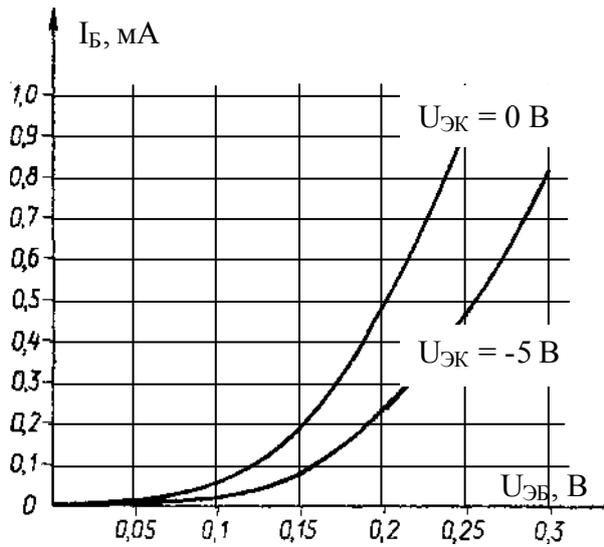
Параметры транзисторов

Тип	$U_{КЭ\text{ МАХ}}, В$	$I_{К\text{ МАХ}}, А$	$P_{К\text{ МАХ}}, Вт$	$h_{21Э}$	$U_{КЭ\text{ НАС}}, В$	$f_{гр}, МГц$
n-p-n						
КТ 331Б-1	15	0,02	0,015	40 - 120	-	250
ГТ 362	5	0,01	0,04	10 - 250	-	2,4
КТ 315 Г	35	0,1	0,15	50 - 350	0,4	250
КТ 312 Б	35	0,03	0,225	25 - 100	0,8	120
КТ 605БМ	250	0,1	0,4	30 - 120	8	40
КТ 603А	30	0,3	0,5	60 - 180	0,8	200
КТ 602БМ	70	0,075	2,8	50 - 220	3	150
КТ 611БМ	180	0,1	3	30 - 120	8	60
КТ 904 А	40	0,8	5	10 - 60	0,6	350
КТ 903 Б	60	3	30	40 - 80	10	120
КТ805АМ	160	5	30	20 - 80	0,5	5
КТ805АМ	160	5	30	20 - 80	0,5	5
КТ 908 Б	60	10	50	20	1	30
КТ 803 А	60	10	60	10 - 70	2,5	20
p-n-p						
ГТ 310 Б	10	0,01	0,02	60 - 120	0,3	160
КТ 201 Г	10	0,03	0,15	70 - 210	-	10
МП 114	60	0,01	0,15	9	-	0,1
ГТ 308 Г	15	0,05	0,15	90 - 200	1,2	120
МП 42	15	0,1	0,2	30 - 50	0,2	1
П 16 А	15	0,05	0,2	30 - 50	-	2
П 26 Б	100	0,4	0,2	30 = 80	-	0,5
ГТ 323 А	20	1,0	0,5	40 - 120	-	200
ГТ 403 Д	45	1,25	4	50 - 150	-	2,4
КТ 835 А	30	3	25	25	0,35	3

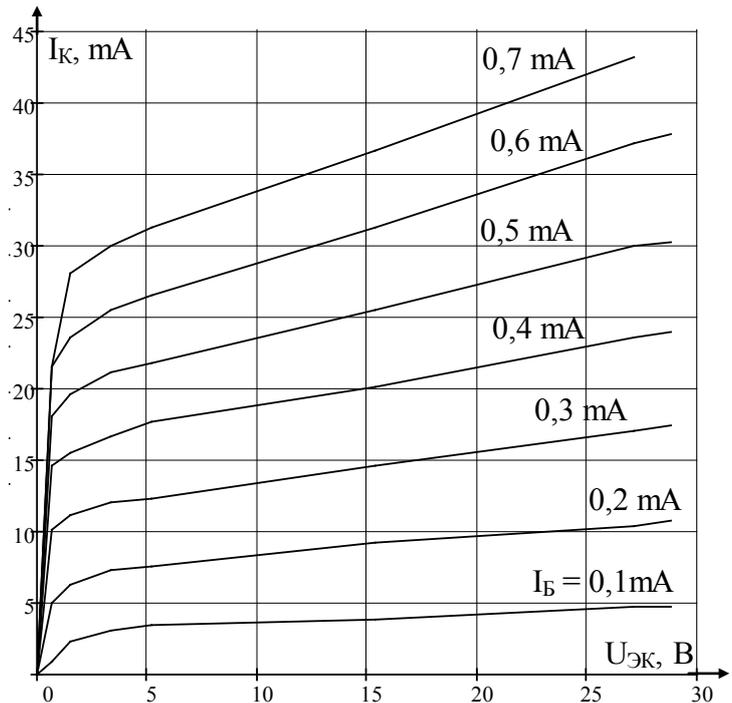
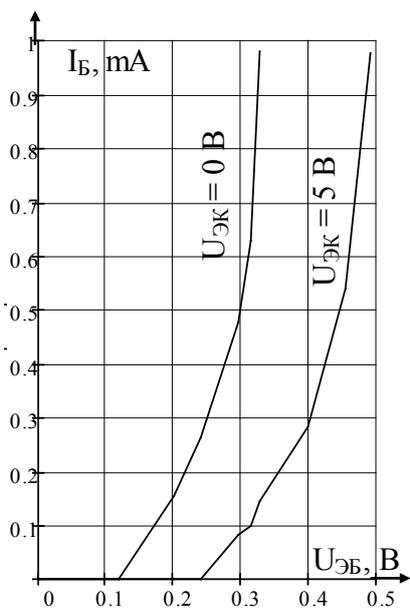
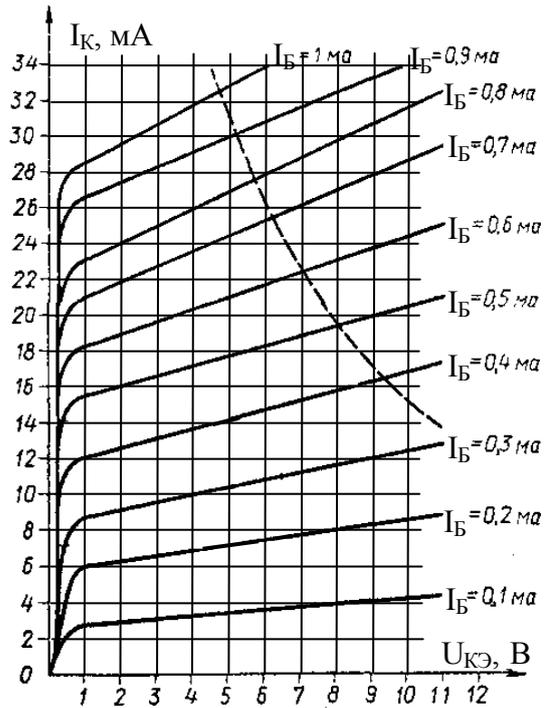
КТ 837 Е	45	7,5	30	20 - 80	0,5	5
----------	----	-----	----	---------	-----	---

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

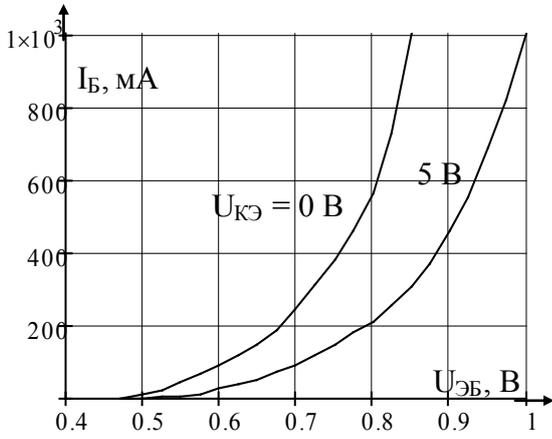
ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ



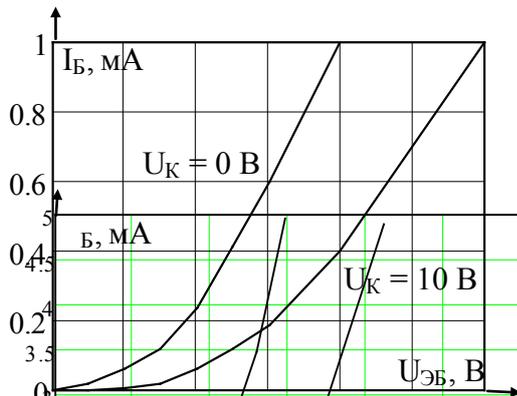
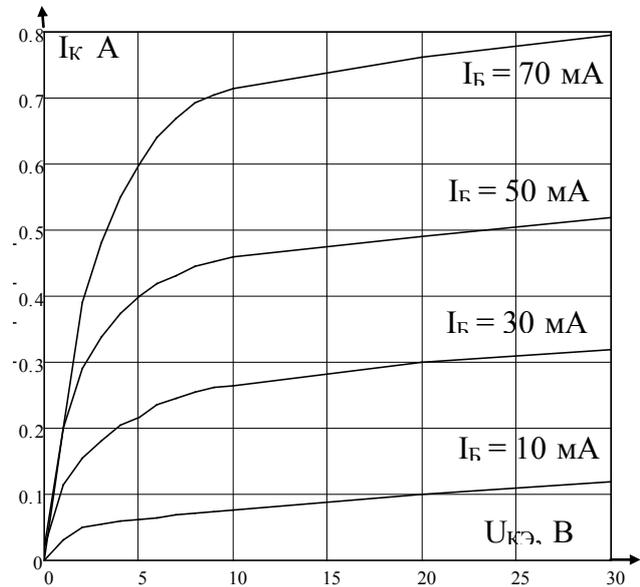
ВАХ транзистора П 16



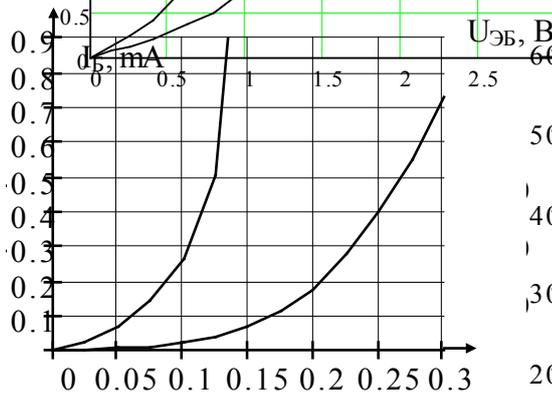
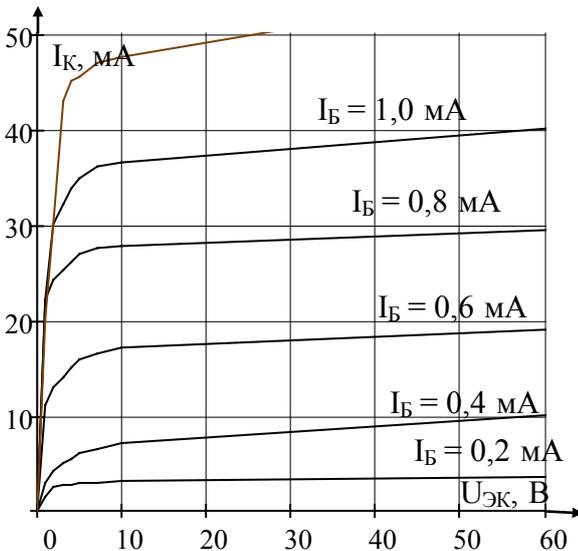
ВАХ транзистора КТ 312Б



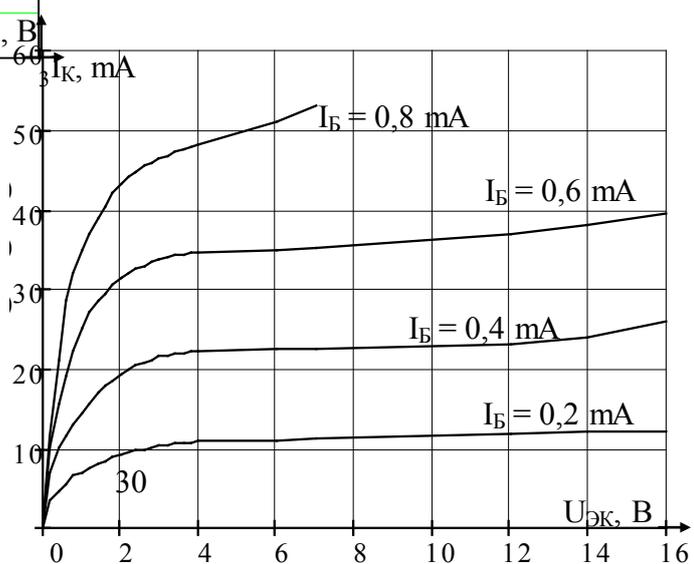
ВАХ транзистора КТ 835 А,Б

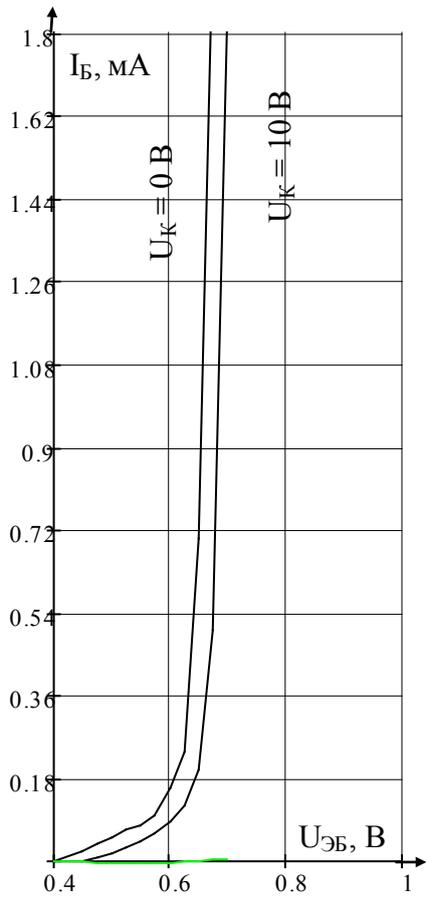


ВАХ транзистора КТ 602

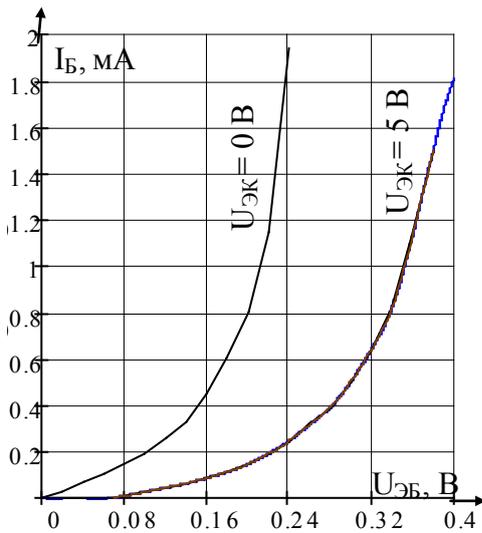
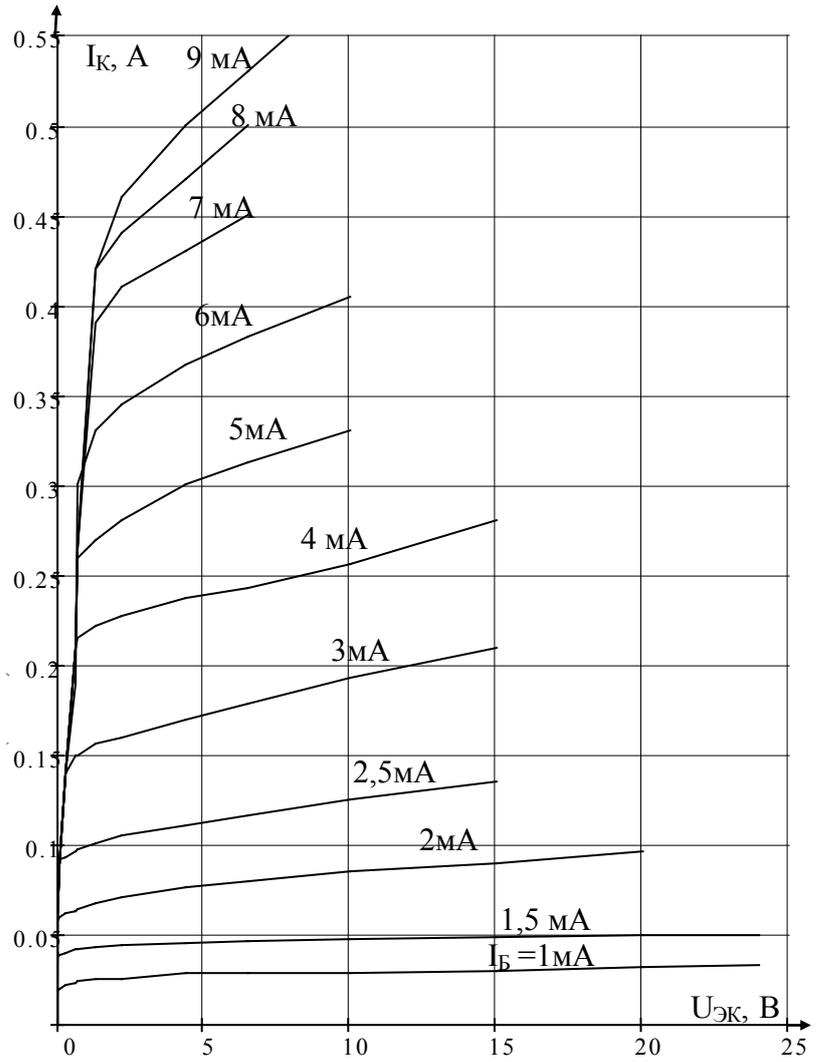


ГТ 308 Б

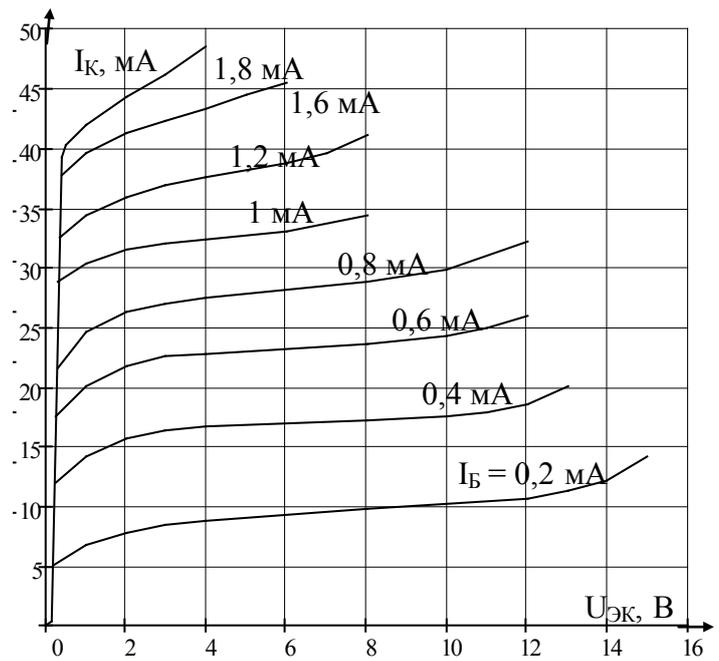




ВАХ транзистора КТ 904



ВАХ транзистора МП 42



СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1. ВЫБОР ВАРИАНТА КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ	2
2. ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ	3
3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	5
4. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	6
4.1 Принцип действия усилителя. нагрузочная прямая	7
4.2 Понятие рабочей точки. классы усилителей	11
4.3 Способы задания рабочей точки	14
4.4 Термостабилизация рабочей точки	17
4.5 Оценка температурной стабильности каскада	19
5. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	22
6. СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ЛИТЕРАТУРЫ	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	28
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	29

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Методические указания к выполнению контрольных работ
по дисциплине «Электроника»
для студентов направления подготовки
«Электроэнергетика и электротехника»
всех форм обучения

Составили: Щеголев Сергей Сергеевич
Кудашева Ирина Олеговна
Рецензент Губатенко Марк Сергеевич
Редактор Крошина Вера Алексеевна

Подписано в печать

Бумага тип.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 2,0

Заказ

Формат 60x84 1/16

Уч. – изд. л. 2,0

Бесплатно

Балаковский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ МИФИ

Типография БИТИ НИЯУ МИФИ

413853, г. Балаково, ул. Чапаева, 140