

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ухтинский государственный технический университет»
(УГТУ)

Кафедра электрификации и автоматизации технологических процессов

Физические основы электроники

Методические указания

Ухта, УГТУ, 2013

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я7

Ф 50

Ф 50 Физические основы электроники [Текст] : метод. указания / З. Х. Ягубов, Л. П. Бойченко, И. А. Дементьев, П. С. Шичёв. – Ухта : УГТУ, 2013. – 23 с., ил.

Методические указания и контрольные задания предназначены для выполнения контрольных работ по дисциплине «Физические основы электроники» для бакалавров-заочников II курса по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (140400).

В методических указаниях даётся задание на выполнение контрольных работ и формулируются требования к их оформлению. Приводятся примеры расчёта задач.

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я7

Содержание методических указаний и контрольных заданий соответствует рабочей учебной программе.

Методические указания и контрольные задания рассмотрены и одобрены кафедрой ЭАТП от 06.09.2013, пр. №01, и предложены для издания.

Рецензент: А. Э. Старцев, доцент кафедры ЭАТП УГТУ, к.т.н.

Редактор: Е. В. Тетеревлёва, доцент кафедры ЭАТП УГТУ.

Корректор: К. В. Коптяева.

Технический редактор: Л. П. Коровкина.

В методических указаниях и контрольных заданиях учтены предложения рецензента и редактора.

План 2013 г., позиция 66.

Подписано в печать 31.10.2013. Компьютерный набор.

Объем 23 с. Тираж 100 экз. Заказ №279.

© Ухтинский государственный технический университет, 2013

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

Типография УГТУ.

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Октябрьская, д. 13.

Введение

Предмет «Физические основы электроники» занимает особое место в системе подготовки специалистов специальности ЭАП. Знания, умения, навыки, полученные студентами при изучении данной дисциплины, являются основой для успешного усвоения учебного материала большинства спецдисциплин, так как рассматриваемые электронные приборы и схемы являются важнейшими элементами микропроцессорных систем, устройств автоматики и информационно-вычислительной техники.

Программа дисциплины базируется на знаниях, полученных в курсах «Физика», «Математика», «Теоретические основы электротехники». В результате изучения дисциплины студент должен:

- иметь представление об электронике и схемотехнике, их роли в современном мире, истории развития элементной базы;
- знать физические процессы и способы управления потоками заряженных частиц в электронных приборах, а также основные параметры, характеристики, особенности и маркировку электронных приборов;
- уметь рассчитывать параметры, элементы электрических и электронных устройств;
- измерять характеристики приборов и схем;
- работать со справочниками по электронным приборам и интегральным схемам.

Общие методические указания к контрольным работам

Контрольные работы выполняют в отдельной тетради, на обложке которой указывают наименование факультета, дисциплины, фамилию, имя и отчество студента, его домашний адрес, номер учебного шифра.

При оформлении каждой задачи следует приводить полную запись условия задачи, таблицу с исходными данными своего варианта, исходную схему с принятыми буквенными обозначениями. Все элементы схем, приводимые в работе, должны вычерчиваться в строгом соответствии с требованиями стандартов. Графики характеристик для решения задач должны быть точно вычерчены на миллиметровой бумаге, в масштабе, удобном для отсчётов. На осях координат должны быть указаны откладываемые значения и единицы их измерения. Под всеми рисунками указывается их название и ставится порядковый номер.

При оформлении контрольной работы нужно указать необходимые расчётные формулы. Расчёты должны сопровождаться пояснительным текстом. Числовые значения величин следует подставлять в основных единицах. Окончательный результат расчёта должен быть вычислен с точностью до трёх значимых цифр. В конце работы необходимо привести список использованной литературы, поставить дату окончания работы и свою подпись.

Контрольная работа 1 заключается в решении пяти задач и ответе на два вопроса. Номер варианта вопросов и двух последних задач (4, 5) определяется путём последовательного вычитания числа 20 из числа образованного двумя последними цифрами учебного шифра до тех пор, пока не образуется число, не превышающее число 20. Номер варианта задач 1, 2, 3 определяется по последней цифре шифра.

Контрольная работа 2, составленная на 50 вариантов, заключается в решении одной задачи. Вариант определяется двумя последними цифрами шифра. Если две последние цифры более 50, то для определения номера варианта необходимо вычесть 50.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 1

Задача 1

Начертите схему включения p - n перехода, соответствующую заданному состоянию; покажите токи, протекающие через p - n переход, их направление и соотношение; укажите порядок величины результирующего тока.

Таблица 1

Номер варианта	Состояние p - n -перехода
1	Прямое включение
2	Равновесное состояние
3	Обратное включение
4	Прямое включение
5	Равновесное состояние
6	Обратное включение
7	Прямое включение
8	Равновесное состояние
9	Обратное включение
10	Прямое включение

Методические рекомендации по решению задачи 1

- 1.1. Приведите условие задачи и таблицу с вашим вариантом задания.
- 1.2. Начертите заданную схему включения p - n -перехода с указанием на ней запирающего слоя, направления движения основных и неосновных носителей заряда.
- 1.3. Укажите приблизительную величину результирующего тока, протекающего через p - n -переход в заданном состоянии.

Задача 2

По заданной маркировке диода определите его тип, дайте ему полную техническую характеристику, укажите физический смысл и рассчитайте заданный параметр.

Ответ должен содержать:

- 1) таблицу с выписанным заданием своего варианта;
- 2) расшифровку маркировки заданного типа диода;
- 3) запись определения данного типа диода;

- 4) краткий ответ, какое свойство p - n -перехода используется в этом типе диода;
- 5) типовую характеристику;
- 6) схему включения;
- 7) область применения;
- 8) ответ о физическом смысле и расчёт заданного параметра.

Таблица 2

Вариант	Марка диода	Параметр диода для п. 8 задания
1	КВ 104А	K_c , если дано: $C_{\min} = 90$ пФ; $C_{\max} = 120$ пФ
2	2Д 215А	K_v , если дано: $I_{обр} = 50$ мкА; $I_{np} = 1$ А (при $U_{np} = U_{обр} = 1$ В)
3	КС 156А	$R_{диф}$, если дано: $I_{cm \min} = 3$ мА; $I_{cm \max} = 55$ мА; $\Delta U_{ст} = 2,3$ В
4	ГД 107Б	K_v , если дано: $I_{обр} = 100$ мкА; $I_{np} = 20$ мА (при $U_{np} = U_{обр} = 1$ В)
5	АИ 201К	$-g_{диф}$, если дано: $I_n = 15$ мА; $I_{en} = 1,5$ мА; $U_n = 0,08$ В $U_{en} = 0,63$ В
6	КВ 135	K_c , если дано: $C_{\min} = 480$ пФ; $C_{\max} = 590$ пФ
7	2С 220Ж	$R_{диф}$, если дано: $I_{cm \min} = 0,5$ мА; $I_{cm \max} = 6,2$ мА; $\Delta U_{cm} = 0,7$ В
8	ГИ 307А	$-g_{диф}$, если дано: $I_n = 14$ мА; $I_{en} = 2$ мА; $U_n = 0,22$ В; $U_{en} = 0,62$ В
9	2Д 206Б	K_v , если дано: $I_{обр} = 700$ мкА; $I_{np} = 5$ А (при $U_{np} = U_{обр} = 1$ В)
10	2С 168А	$R_{диф}$, если дано: $I_{cm \min} = 3$ мА; $I_{cm \max} = 45$ мА; $\Delta U_{cm} = 1,1$ В

Методические рекомендации по решению задачи 2

- 2.1. Приведите задание и таблицу с вашим вариантом задания.
- 2.2. Пользуясь справочником, разберитесь в системе принятых обозначений полупроводниковых диодов. Расшифруйте маркировку заданного диода.
- 2.3. Определив по маркировке тип заданного диода, приведите запись определения данного диода.
- 2.4. Разберитесь в принципе действия рассматриваемого диода. Приведите схему включения диода.
- 2.6. Приведите характеристику рассматриваемого диода. На ней выделите рабочий участок.
- 2.7. Укажите область применения заданного типа диода.
- 2.8. Объясните физический смысл заданного параметра и приведите формулу его расчёта.

Задача 3

По справочнику выберите биполярный транзистор согласно условию своего варианта. Выполните необходимые вычисления, построения и сделайте выводы. Укажите физический смысл заданного параметра.

Ответ должен содержать:

- 1) таблицу с выписанным заданием своего варианта;
- 2) таблицу с обозначением выбранного транзистора и его справочными данными;
- 3) запись определения биполярного транзистора;
- 4) заданную схему включения транзистора;
- 5) запись о том, какие токи и напряжения являются для данной схемы входными и выходными;

- 6) особенности данной схемы включения;
- 7) входную и выходные характеристики транзистора, включённого с ОЭ;
- 8) расчёт и построение нагрузочной прямой с обозначением на выходных характеристиках величин: E_K ; $I_{K.p.m.}$; $U_{Kэ.p.m.}$; $U_{Rн}$; $I_K = E_K/R_{н}$;
- 9) данные режима работы транзистора;
- 10) таблицу расчёта линии допустимых режимов, построение этой линии на выходных характеристиках, вывод о допустимости работы транзистора в заданном режиме;
- 11) обозначение на выходных характеристиках транзистора областей насыщения и отсечки;
- 12) ответ о физическом смысле заданного параметра;
- 13) расшифровку маркировки заданного транзистора.

Таблица 3

Вариант	Условия выбора транзистора	Схема включения и режим работы транзистора	Данные для построения нагрузочной прямой					Параметр
			E_K	$R_{н}$	$I_{крт}$	$I_{брт}$	$U_{кэрт}$	
1	$f_{cp} = 120$ МГц наибольшее $U_{Kэ max}$	С ОБ, режим отсечки, динамический	24 В			1 мА	12 В	$h_{21э}$
2	$f_{cp} = 20$ МГц наибольший $h_{21э max}$	С ОЭ, режим активный, статический		12к Ом	2,1 А		20 В	$P_{K max}$
3	$f_{cp} = 60$ МГц наибольший $h_{21э min}$	С ОК, режим насыщения, динамический	30 В	250 Ом		1 мА		f_{cp}
4	$f_{cp} = 6$ МГц наибольшее $U_{Kэ max}$	С ОЭ, режим отсечки, статический	20 В		1,6 мА		12,5 В	$h_{22э}$
5	$f_{cp} = 30$ МГц наибольшее $U_{Kб max}$	С ОБ, режим насыщения, статический		40 Ом		4 мА	8 В	$U_{Kэ max}$
6	$f_{cp} = 5,5$ МГц $h_{21э min} = 15$	С ОК, режим активный, динамический	120 В			20 мА	60 В	$h_{11б}$
7	$f_{cp} = 7$ МГц $U_{Kэ max} = 50$	С ОЭ, режим насыщения, динамический	60 В	20 Ом	1,75 А			$I_{Kбо}$
8	$f_{cp} = 7,5$ МГц наибольшее $U_{Kэ max}$	С ОБ, режим активный, динамический	50 В		0,4 мА		17 В	f_{h21}
9	$f_{cp} = 90$ МГц $P_{K max} = 1,5$ Вт	С ОК, режим отсечки, статический		270 Ом	78 мА		14 В	$P_{K max}$
10	$f_{cp} = 30$ МГц $P_{K max}$ – наименьшая	С ОЭ, режим активный, динамический	20 В	40 Ом		4 мА		$h_{21б}$

Методические рекомендации по решению задачи 3

3.1. Приведите условие задачи и таблицу с вашим вариантом задания. Некоторые графы этой таблицы окажутся незаполненными. После решения задачи и нахождения всех значений недостающих величин заполнять пустые клетки не требуется.

3.2. Для выбора транзистора следует использовать справочник. Нужно отыскать все транзисторы с заданной f_{cp} . Затем из этой группы выбрать тот единственный, который удовлетворяет второму условию выбора. Выбрав транзистор, приведите в тетради таблицу с его справочными данными по форме:

Таблица 4

Тип транзистора	Структура транзистора	f_{cp} , МГц	$P_{к\max}$, Вт	$U_{кэ\max}$, В	$I_{к\max}$, А	$h_{21э\min}$	$h_{21э\max}$

3.3. Запишите определение биполярного транзистора.

3.4. Начертите схему, соответствующую режиму работы и схему включения биполярного транзистора.

3.5. В соответствии со схемой включения транзистора запишите, какие токи и напряжения являются входными, какие – выходными.

3.6. Приведите особенности схемы включения, проанализировав эту схему по ряду показателей: $R_{вх}$, $R_{вых}$, K_I , K_U , K_P . Дайте качественную и количественную характеристику этим показателям.

3.7. Постройте входную и выходную характеристики транзистора, используя справочник.

3.8. Постройте нагрузочную прямую транзистора, используя уравнение нагрузочной прямой: $U_{кэ} = E_k - I_k \cdot R_n$. В тетради обязательно приведите пояснение построения нагрузочной прямой: по каким точкам построена, координаты этих точек, расчёт координат.

3.9. Имея положение рабочей точки на выходных характеристиках, перенесите её на входную характеристику при $U_{кэ} \neq 0$. Определите координаты рабочей точки.

3.10. Постройте линию допустимых режимов работы транзистора, используя соотношение: $I_k \cdot U_{кэ} = P_{к\max}$. По графику сделайте вывод о допустимости использования заданного режима работы транзистора.

3.11. В импульсных и вычислительных устройствах транзисторы используются в режимах отсечки и насыщения.

3.12. Поясните физический смысл заданного параметра.

3.13. Расшифруйте маркировку транзистора.

Указания по выполнению контрольных задач 4 и 5

При решении задач нужно иметь в виду, что обычно расчёт сопротивлений резисторов и параметров других элементов производится с точностью порядка нескольких процентов. Поэтому после расчёта следует округлять результат, оставляя не более двух-трёх значащих цифр. По той же причине часто при расчёте можно пользоваться упрощёнными формулами. Например, при расчёте режимов работы транзисторов можно пренебречь напряжением между базой и эмиттером по сравнению с напряжением источника питания (в случае открытого транзистора). Точно также можно полагать, что в режиме насыщения транзистора напряжение между коллектором и эмиттером равно нулю. Обычно оно бывает порядка 0,1 В, и им чаще всего можно пренебречь по сравнению с напряжением источника питания. При расчётах транзисторных схем можно также считать, что коллекторный ток транзистора практически не зависит от напряжения на коллекторе и равен произведению тока базы на коэффициент передачи тока из базы в коллектор. При этом статический коэффициент передачи тока для больших сигналов считают равным коэффициенту передачи тока для малых сигналов $h_{21Э}$.

Задача 4

В схеме простейшего усилителя низкой частоты на транзисторе (рис. 1) начальное смещение базы в режиме покоя задаётся током резистора R_B . Даны параметры R_K , E_K и $h_{21Э}$. Рассчитать значение R_B так, чтобы в режиме покоя между коллектором и эмиттером транзистора было задано напряжение $U_{КЭ}$.

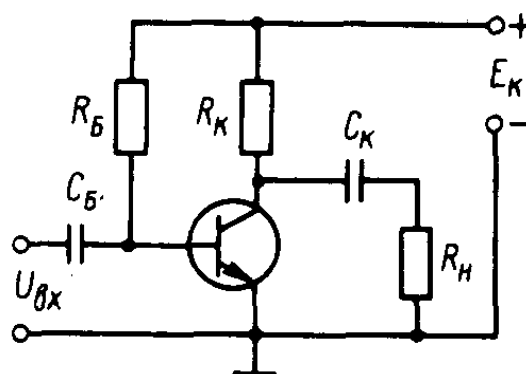


Рис.1

Таблица 5

Вариант	Данные к задаче 4			
	R_K , кОм	E_K , В	$h_{21Э}$	$U_{КЭ}$, В
1	1,2	10	35	5
2	5,6	15	80	6
3	4,3	9	15	3
4	2,0	12	45	7
5	1,5	6	30	3
6	2,4	14	50	9
7	1,8	11	25	7,5
8	3,6	8,5	40	2,4
9	1,6	7,5	60	5,1

10	3,2	13	85	4,5
11	7,5	12	65	8
12	8,2	16	50	10,2
13	10,5	12	28	4,4
14	12,0	16	65	11,4
15	9,4	12	40	7,4
16	4,8	8,6	25	2,6
17	10,2	11,8	80	4,5
18	8,6	14	55	7,5
19	6,3	10,5	35	5,4
20	5,6	9	42	4,7

Задача 5

В схеме транзисторного ключа (рис. 2) даны сопротивление резистора R_K и значение параметра $h_{21Э}$ транзистора, а также напряжение питания E_K . Рассчитать значение R_B так, чтобы в отсутствие входных сигналов транзистор находился в насыщении с коэффициентом насыщения $S_{НАС}$. Найти ток коллектора.

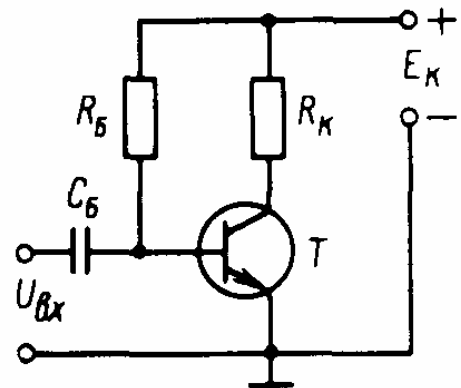


Рис. 2

Таблица 6

Вариант	Данные к задаче 5			
	R_K , кОм	$h_{21Э}$	$S_{НАС}$	E_K , В
1	2,0	50	1,5	10
2	3,2	40	1,25	8,5
3	5,4	30	2,1	12,5
4	1,5	15	2,5	9
5	2,5	80	1,7	11,8
6	1,25	45	1,35	10,5
7	3,5	25	1,9	7,5
8	2,7	18	1,6	6
9	4,5	85	2,25	14
10	1,8	28	1,4	16
11	10,5	45	1,55	9,6
12	12	35	2,7	10,4
13	9,6	70	3,2	12
14	7,4	85	1,45	10,2
15	8,2	120	1,8	9,6
16	13	40	2,25	8,8
17	10,2	55	3,2	13,6
18	4,5	30	2,8	8,4
19	5,6	55	2,4	16,5
20	6,4	75	3,4	14,8

Вопрос 1

1. Как образуется в полупроводнике электронно-дырочный переход?
2. Почему вне запирающего слоя p - n -перехода слои полупроводника нейтральны? Какими зарядами создаются запирающий слой и внутреннее электрическое поле перехода?
3. Объясните зависимость ширины запирающего слоя p - n -перехода от приложенного напряжения.
4. Какой зависимостью связаны диффузионная длина и время жизни? Напишите соотношение Эйнштейна.
5. Что такое собственная электропроводность? Может ли примесный полупроводник обладать собственной электропроводностью?
6. Какие факторы создают собственную электропроводность кристалла?
7. Как влияет температура на проводимость полупроводникового кристалла?
8. Как влияют примесные зоны на процесс образования пар свободных носителей заряда?
9. Построить энергетическую диаграмму кристалла кремния с фосфорной примесью.
10. Где располагается энергетическая зона атомов галлия, введённых в качестве примеси в германий? Построить энергетическую диаграмму.
11. Что такое коэффициент насыщения транзистора? Какие значения этого коэффициента используют на практике?
12. Начертите структурную схему полевого транзистора с p - n -переходом и с каналом n -типа. Поясните принцип его работы.
13. Начертите структурную схему биполярного p - n - p -транзистора, поясните принцип его работы.
14. Поясните, как влияет на форму канала полевого транзистора изменение напряжения на затворе при фиксированном напряжении на стоке, а также изменение напряжения на стоке – при фиксированном напряжении на затворе.
15. Начертите структурную схему полевого транзистора типа МДП. Поясните принцип его работы.
16. Что такое интегральная микросхема? Каковы преимущества ИМС по сравнению с аппаратурой на дискретных элементах? Какие основные типы ИМС выпускаются промышленностью?
17. Что такое контактная разность потенциалов и чем ограничивается её величина?
18. Что такое физический уровень Ферми? Запишите функцию Ферми.
19. Что такое туннельный эффект?
20. Чем объясняются ёмкостные свойства p - n -перехода? Что такое диффузионная и зарядная ёмкости?

Вопрос 2

1. Как объясняют собственный, электронный и дырочный типы электропроводности полупроводников с точки зрения структуры вещества и зонной теории?

2. Какие контактные явления происходят в p - n -переходе? Что такое контактная разность потенциалов?
3. Как объясняются выпрямительные свойства p - n -перехода? Дайте физическое объяснение каждого участка вольт-амперных характеристики p - n -перехода.
4. В чём различия вольт-амперных характеристик электровакуумного и полупроводникового диодов? Чем они объясняются?
5. Какие существуют типы полупроводниковых диодов? Где они применяются?
6. Чем определяется максимальное напряжение, подаваемое на полупроводниковый диод в прямом направлении? Чему оно равно? Ответьте на тот же вопрос для обратного приложенного напряжения.
7. Какие бывают виды пробоя p - n -перехода? В каком приборе явление пробоя используется как полезное?
8. Какова структура плоскостного биполярного транзистора? Какие напряжения подаются на его p - n -переходы в разных режимах работы?
9. Какие процессы происходят в транзисторной структуре в усиленном режиме работы?
10. Какие существуют схемы включения транзистора? Что при этом усиливает транзистор (ток или напряжение)?
11. Напишите формулу, связывающую коэффициенты передачи тока α и β транзистора в схемах ОБ и ОЭ. С какими из h -параметров совпадает коэффициент β ?
12. Напишите формулы, связывающие: а) токи эмиттера, коллектора и базы; б) токи базы и коллектора; в) токи эмиттера и коллектора.
13. Напишите выражения, с помощью которых вводятся h -параметры, и объясните физический смысл каждого из этих параметров.
14. Постройте семейства входных и выходных характеристик биполярного транзистора. Дайте объяснения вида кривых.
15. По семействам характеристик транзистора в схеме ОЭ графически определить все четыре h -параметра.
16. На семействе выходных характеристик транзистора в схеме ОЭ проведите выходную нагрузочную характеристику. Как изменится её вид при изменении: а) напряжения питания при том же сопротивлении коллекторной нагрузки R_k ; б) сопротивления R_k при том же напряжении питания? Напишите уравнение для выходной нагрузочной характеристики.
17. Что такое коэффициент насыщения $S_{нас}$ транзистора? Какие значения этого коэффициента используют на практике?
18. Начертите структурную схему полевого транзистора с p - n -переходом и с каналом n -типа. Поясните принцип его работы.
19. Что называют истоком и стоком полевого транзистора? Можно ли поменять их местами при включении?
20. Начертите схему для снятия статических характеристик: а) биполярного транзистора; б) полевого транзистора. Поясните, как снимаются эти характеристики.

Усилители на биполярных транзисторах

Усилители являются одним из самых распространённых электронных устройств, применяемых в системах автоматики и радиосистемах. Усилители подразделяются на усилители предварительные (усилители напряжения) и усилители мощности. Предварительные транзисторные усилители, как и ламповые, состоят из одного или нескольких каскадов усиления. При этом все каскады усилителя обладают общими свойствами, различие между ними может быть только количественное: разные токи, напряжения, различные значения резисторов, конденсаторов и т. п.

Для каскадов предварительного усилителя наиболее распространены резистивные схемы (с реостатно-ёмкостной связью). В зависимости от способа подачи входного сигнала и получения выходного усилительные схемы получили следующие названия:

- 1) с общим эмиттером – ОЭ (рис. 3);
- 2) с общей базой ОБ (рис. 4);
- 3) с общим коллектором (эмиттерный повторитель) – ОК (рис. 5).

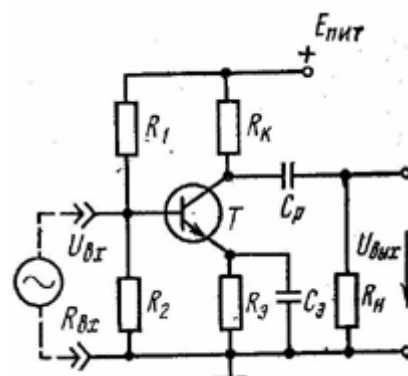


Рис. 3

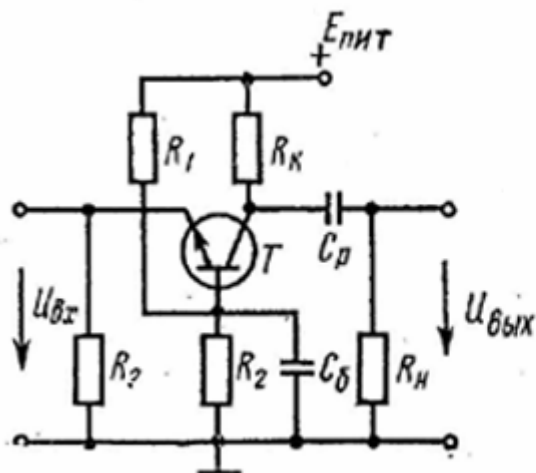


Рис. 4

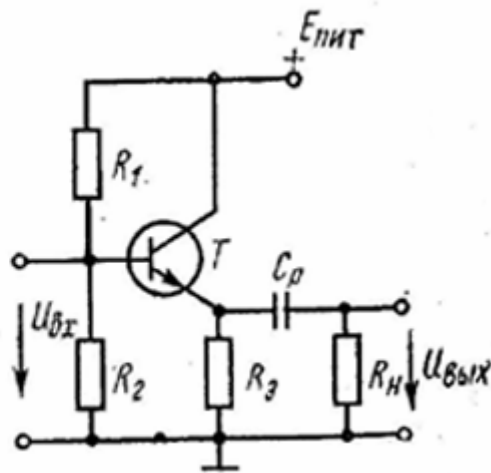


Рис. 5

Наиболее распространённой является схема с ОЭ. Схема с ОБ в предварительных усилителях встречается редко. Эмиттерный повторитель обладает наибольшим из всех трёх схем входным и наименьшим выходным сопротивлениями, поэтому его применяют при работе с высокоомными преобразователями в качестве первого каскада усилителя, а также для согласования с низкоомным нагрузочным резистором. В табл. 7 даётся сопоставление различных схем включения транзисторов.

Таблица 7

Параметры	Схема включения		
	с общей базой (ОБ)	с общим эмиттером (ОЭ)	с общим коллектором (ОК)
Коэффициент усиления по напряжению	30-400	30-1000	≈ 1
Коэффициент усиления по току	≈ 1	10-200	10-200
Коэффициент усиления по мощности	30-400	3000-30 000	10-200
Входное сопротивление	50-100 Ом	200-2000 Ом	10-500 кОм
Выходное сопротивление	0,1-0,5 мОм	30-70 кОм	50-100 Ом

Рассмотрим усилительный каскад с ОЭ. При расчёте каскада усилителя обычно известны: 1) R_n – сопротивление нагрузки, на которую должен работать рассчитываемый каскад; нагрузкой может являться и аналогичный каскад; 2) $I_{н\ m}$ или $U_{н\ m}$ – необходимое значение амплитуды тока или напряжения нагрузки; 3) допустимые частотные искажения; 4) диапазон рабочих температур; 5) напряжение источника питания коллекторной цепи в большинстве случаев является заданным.

В результате расчёта должны быть определены: 1) тип транзистора; 2) режим работы выбранного транзистора; 3) параметры каскада; 4) значения всех элементов схемы (резисторы, конденсаторы), их параметры и типы.

Расчёт каскада усилителя напряжения низкой частоты с реостатно-ёмкостной связью

Последовательность расчёта приводится для транзистора, включённого по схеме с ОЭ. На рис. 3 дана схема каскада усилителя.

Исходные данные: 1) напряжение на выходе каскада $U_{вых\ max}$ (напряжение на нагрузке); 2) сопротивление нагрузки R_n ; 3) нижняя граничная частота f_n ; 4) допустимое значение коэффициента частотных-3-искажений каскада в области нижних частот M_n ; 5) напряжение источника питания $E_{пит}$.

Примечание. Считать, что каскад работает в стационарных условиях ($T_{min} = +15^\circ\text{C}$; $T_{max} = 25^\circ\text{C}$). При расчёте влиянием температуры на режим транзистора пренебрегаем.

Определить: 1) тип транзистора; 2) режим работы транзистора; 3) сопротивление коллекторной нагрузки R_k ; 4) сопротивление в цепи эмиттера R_3 ; 5) сопротивление делителя напряжения R_1 и R_2 , стабилизирующие режим работы транзистора; 6) ёмкость разделительного конденсатора C_p ; 7) ёмкость конденсатора в цепи эмиттера C_3 ; 8) коэффициент усиления каскада по напряжению.

Порядок расчёта:

1. Выбираем тип транзистора, руководствуясь следующими соображениями: а)

$U_{кз\ доп} \geq (1,1 \div 1,3)E_{пит}$, $U_{кз\ доп}$ – наибольшее допустимое напряжение между коллектором

и эмиттером, приводится в справочниках; б) $I_{к доп} > 2I_{нт} = \frac{2U_{вых м}}{R_n}$, $I_{нт}$ – наибольшая возможная амплитуда тока нагрузки; $I_{к доп}$ – наибольший допустимый ток коллектора, приводится в справочниках.

Примечания:

а) заданному диапазону температур удовлетворяет любой транзистор;

б) для выбранного типа транзистора выписать из справочника значения коэффициентов усиления по току для ОЭ β_{min} и β_{max} (или $h_{21 min}$ и $h_{21 max}$). В некоторых справочниках даётся коэффициент усиления a по току для схемы ОБ и начальный ток коллектора $I_{кн}$. Тогда $\beta = a/(1-a)$ (при выборе режима работы транзистора необходимо выполнить условие $I_{к min} \geq I_{кн}$);

в) для каскадов усилителей напряжения обычно применяют маломощные транзисторы типа ГТ-108, ГТ-109, МП20, МП21, МП25, МП40, МП41, МП42, МП111, МП113 и др. Выбор конкретного типа транзистора производится по справочной литературе.

2. Режим работы транзистора определяем по нагрузочной прямой, построенной на семействе входных статических (коллекторных) характеристик для ОЭ. Построение нагрузочной прямой показано на рис. 6. Нагрузочная прямая строится по двум точкам: 0 – точка покоя (рабочая) и 1, определяемая значением напряжения источника питания $E_{пит}$. Координатами 0 являются ток покоя $I_{к0}$ и напряжения покоя $U_{кэ0}$ (т. е. ток и напряжение, соответствующие $U_{вх} = 0$). Можно принять $I_{к0} = (1,05 \div 1,2)I_{вых} \approx (1,05 \div 1,2)I_{нт}$. Напряжение покоя: $U_{кэ0} = U_{вых м} + \Delta U_{кэ} = U_{к т} + U_{кэ}$, где $\Delta U_{кэ}$ – напряжение на коллекторе, соответствующее области нелинейных начальных участков выходных характеристик транзистора. Для маломощных транзисторов можно принять $\Delta U_{кэ} = 0,5 \div 1,0$ В.

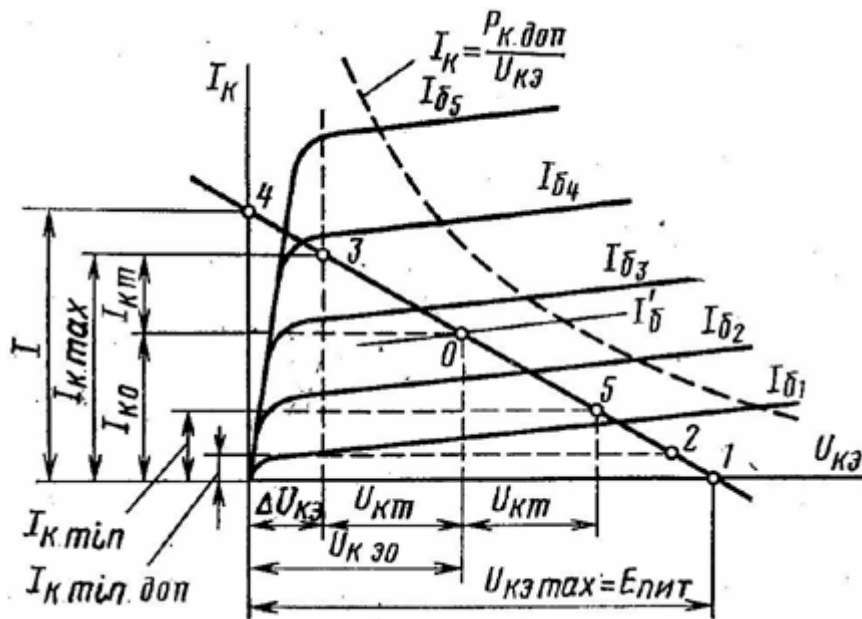


Рис. 6

3. Определяем значения сопротивлений R_k и R_3 . По выходным характеристикам (рис. 6) определяем $R_{об} = R_k + R_3$. Общее сопротивление в цепи эмиттер – коллектор $R_{об} = \frac{E_{num}}{I}$, где I – ток, определяемый точкой 4, т. е. точкой пересечения нагрузочной прямой с осью токов.

Принимая $R_3 = (0,15 \div 0,25)R_k$, получаем: $R_k = R_{об}/(1,15 \div 1,25)$; $R_3 = R_{об} - R_k$.

4. Определяем наибольшие амплитудные значения входного сигнала тока $I_{вх\ m}$ и напряжения $U_{вх\ m}$, необходимые для обеспечения заданного значения $U_{вых\ m}$. Задаввшись наименьшим значением коэффициента усиления транзистора по току β_{min} , получаем $I_{вх\ m} = I_{б\ m} = I_{б\ m}/\beta_{min}$, причём ток $I_{вх\ m}$ не должен превышать значения $(I_{б\ max} - I_{б\ min})/2$, где для маломощных транзисторов $I_{б\ max} \approx 1 \div 2$ мА, $I_{б\ min} = 0,05$ мА. По входной статической характеристике для схем ОЭ (рис. 5) и найденным значениям $I_{б\ min}$ и $I_{б\ max}$ находят значение $2U_{вх\ m}$.

5. Определяем входное сопротивление $R_{вх}$ каскада переменному току (без учёта делителя напряжения R_1 и R_2):

$$R_{вх} = 2U_{вх\ m}/2I_{вх\ m} \approx 2U_{вх\ m}/2I_{б\ m}.$$

6. Рассчитываем сопротивления делителя R_1 и R_2 . Для уменьшения шунтирующего действия делителя на входную цепь каскада по переменному току принимают

$$R_{1-2} \geq (8 \div 12)R_{вх},$$

где $R_{1-2} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$.

Тогда

$$R_1 = E_{num} R_{1-2} / R_3 I_3 = E_{num} R_{1-2} / R_3 I_{к0};$$

$$R_2 = R_1 R_{1-2} / (R_1 - R_{1-2}).$$

7. Коэффициент неустойчивости работы каскада

$$S = \frac{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_3(R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{1 + \beta_{max}}},$$

β_{max} – наибольший возможный коэффициент усиления по току выбранного типа транзистора.

Для нормальной работы каскада коэффициент неустойчивости не должен превышать нескольких единиц.

8. Определяем ёмкость разделительного конденсатора C_p :

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_n R_{вых} \sqrt{M_n^2 - 1}};$$

$$R_{вых} = R_{блх\ m} R_k / (R_{блх\ m} + R_k) + R_n,$$

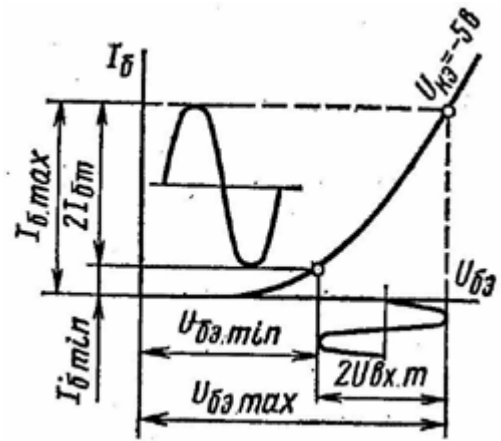


Рис. 7

где $R_{\text{вых } m}$ – выходное сопротивление транзистора, определяемое по выходным статическим характеристикам для схемы ОЭ. В большинстве случаев $R_{\text{вых } m} \gg R_K$, поэтому можно принять $R_{\text{вых}} \approx R_K + R_H$.

9. Находим ёмкость конденсатора $C_3 \geq 10/2\pi f_H R_3$.

10. Рассчитываем коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_u = U_{\text{вых } m} / U_{\text{вх } m}.$$

Примечание: Приведённый порядок расчёта не учитывает требований на стабильность работы каскада.

При анализе транзисторных усилителей широкое распространение получили h -параметры. Электрическое состояние транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, характеризуется четырьмя величинами: I_B , U_{BE} , I_K и U_{KE} . Из практических соображений удобно выбирать в качестве независимых значений U_{KE} и I_B , тогда $U_{BE} = f_1(I_B, U_{KE})$ и $I_K = f_2(I_B, U_{KE})$.

В усилительных схемах входным и выходным сигналами являются приращения входных и выходных напряжений и токов. В пределах линейной части характеристик для приращений ΔU_{BE} и ΔI_K справедливы равенства

$$\begin{aligned} \Delta U_{BE} &= h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{KE}, \\ \Delta I_K &= h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{KE}, \end{aligned} \quad (1)$$

где h -параметры – соответствующие частные производные, которые легко можно найти по семейству входных и выходных характеристик транзистора, включённого по схеме ОЭ:

$$h_{11} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B \text{ при } U_{KE} = \text{const} (\Delta U_{KE} = 0);$$

$$h_{12} = \Delta U_{BE} / \Delta U_{KE} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0);$$

$$h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{KE} = \text{const} (\Delta U_{KE} = 0);$$

$$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{KE} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0).$$

Значение h_{11} представляет собой входное сопротивление транзистора. Безразмерный параметр h_{12} является коэффициентом обратной связи по напряжению. Как показывает анализ схем на транзисторах, значение $h_{12} = 0.002 \div 0.0002$, поэтому при практических расчётах его можно полагать равным нулю: h_{21} – безразмерный коэффициент передачи по току, характеризующий усилительные свойства (по току) транзистора при постоянном напряжении на коллекторе; h_{22} характеризует выходную проводимость транзистора при постоянном токе базы; h -параметры хорошо описывают работу транзистора в области низких и средних частот.

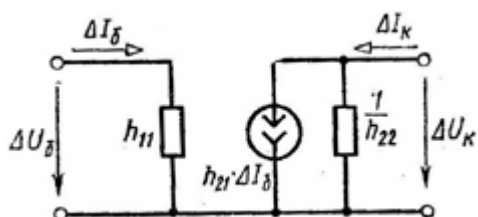


Рис. 8

В соответствии с уравнениями (1) на рис. 8 изображена схема замещения транзистора для переменных составляющих токов и напряжений при $h_{12} = 0$. Для расчёта параметров усилителя необходимо определить h -параметры вблизи рабочей точки по семействам соответствующих характеристик.

При этом коэффициент усиления усилителя по напряжению в режиме холостого хода

$$K_{ux} = \frac{R_k}{1 + h_{22}R_k} \approx \frac{h_{21}}{h_{11}} R_{\bar{e}},$$

а при нагрузке (R_n): $K_u = K_{ux} \frac{R_n}{R_n + R_k}$.

Входное сопротивление усилителя $R_{вх} \approx h_{11}$, а выходное сопротивление – $R_{вых} \approx R_k$.

Задача. Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения для схемы с общим эмиттером (см. рис. 3):

$$U_{вых м} = 4 \text{ В}, R_n = 500 \text{ Ом}, f_n = 100 \text{ Гц}, \\ M_n = 1,2, E_{пит} = 12 \text{ В}.$$

Решение.

$$1. U_{кэ доп} \geq E_{пит} = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ В}.$$

$$I_{к доп} > 2I_{н м} = 2 \frac{U_{вых м}}{R_n} = 2 \frac{4}{500} = 0,016 \text{ А} = 16 \text{ мА}.$$

Выбираем транзистор МП42А, для которого $I_{к доп} = 30 \text{ мА}$;

$$U_{кэ доп} = 15 \text{ В}, \beta_{\min} = 30, \beta_{\max} = 50, I_{к \min доп} = 25 \text{ мкА}.$$

2. Для построения нагрузочной прямой находим (рабочую) точку покоя (0); для этого определяем

$$I_{к0} = 1,2I_{н м} = 1,2 \cdot 8 = 9,6 \text{ мА}; \\ U_{кэ0} = U_{вых м} + \Delta U_{кэ} = 4 + 1 = 5 \text{ В}.$$

Вторая точка нагрузочной прямой $U_{кэ} = E_{пит} = 12 \text{ В}$. По полученным значениям строится нагрузочная прямая.

3. По статическим выходным характеристикам и нагрузочной прямой находим $I = 18 \text{ мА}$, откуда

$$R_{об} = 12 / (18 \cdot 10^{-3}) = 670 \text{ Ом}.$$

Следовательно,

$$R_k = R_{об} / 1,2 = 670 / 1,2 = 560 \text{ Ом}; \\ R_э = R_{об} - R_k = 670 - 560 = 110 \text{ Ом}.$$

4. Наименьший коэффициент усиления по току (для схемы ОЭ) для транзистора МП42А $\beta_{\min} = 30$, тогда $I_{BX \min} = I_{\bar{e} \min} = I_{K \min}$. Из-за малого значения $I_{K \min}$ можно принять $I_{K \min} \approx 0$ и, следовательно, $I_{\bar{e} \min} \approx 0$.

$$I_{\bar{e} м} = I_{к м} / \beta_{\min} = 14 / 30 = 0,47 \text{ мА}.$$

Амплитуда входного тока

$$I_{\bar{e} м} = I_{\bar{e} \min} - I_{\bar{e} \max} / 2 = 0,47 / 2 = 0,235 \text{ мА}.$$

По входной статической характеристике (для схемы ОЭ):

$$U_{\bar{e}э \min} = 0,11 \text{ В}; \quad U_{\bar{e}э \max} = 0,33 \text{ В}; \\ 2U_{\bar{e}э м} = U_{\bar{e}э \max} - U_{\bar{e}э \min} = 0,33 - 0,11 = 0,22 \text{ В}.$$

5. Находим входное сопротивление транзистора переменному току:

$$R_{вх \sim} = 2U_{\bar{e}э м} / 2I_{\bar{e} м} = 0,22 / 0,47 \times 10^{-3} \approx 470 \text{ Ом}.$$

6. Для определения R_1 и R_2 находим $R_{1-2} \geq 8R_{\text{ex}} = 8 \times 470 \approx 3800 \text{ Ом}$.

Отсюда

$$R_1 = E_{II} R_{1-2} / R_3 I_{K0} = 12 \times 3800 / 110 \times 9,6 \times 10^{-3} = 43\,000 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_1 R_{1-2} / (R_1 - R_{1-2}) = 43000 \times 3800 / (43000 - 3800) = 4200 \text{ Ом}.$$

7. Определяем, будет ли схема достаточно стабильна:

$$S = \frac{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2 / (1 + \beta_{\text{MAX}})} =$$

$$= \frac{110(43000 + 4200) + 43000 \times 4200}{110(43000 + 4200) + 43000 \times 4200 / (1 + 50)} \approx 2.66.$$

Следовательно, работа рассчитанного каскада достаточно стабильна.

8. Определяем ёмкость

$$C_p \geq \frac{1}{2\pi f_H (R_K + R_H) \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 100(560 + 500) \sqrt{1.2^2 - 1}} = 2.28 \times 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Принимаем $C_p = 3,0 \text{ мкФ}$.

9. Находим ёмкость:

$$C_3 \geq \frac{10}{2\pi f_H R_3} = \frac{10}{2 \times 3.14 \times 100 \times 110} = 159 \times 10^{-6} \text{ мкФ}.$$

Для полного устранения отрицательной обратной связи необходимо включить $C_3 \geq 159 \text{ мкФ}$. Эта ёмкость слишком велика. Обычно используют $C_3 = 10 \div 30 \text{ мкФ}$. Принимаем $C_3 = 20 \text{ мкФ}$.

10. Коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_u = U_{\text{вых м}} / U_{\text{вх м}} = 4/0,11 = 36,4.$$

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 2

Задача 1

Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения, принципиальная схема которого изображена на рис. 3, и определить h -параметры выбранного типа транзистора. Данные для расчёта приведены в табл. 8.

Таблица 8

Номер варианта	Данные для расчёта				
	$U_{\text{вых м}}, \text{ В}$	$R_H, \text{ Ом}$	$f_H, \text{ Гц}$	$E_{\text{пит}}, \text{ В}$	M_H
0	3,0	600	100	12	1,20
1	2,0	400	90	16	1,20
2	1,0	250	120	9	1,25
3	5,0	450	200	27	1,30
4	8,0	350	150	12	1,30
5	2,4	600	180	3	1,25
7	1,6	280	160	6	1,20

Номер варианта	Данные для расчёта				
	$U_{вых\ m}$, В	R_n , Ом	f_n , Гц	$E_{нит}$, В	M_n
9	2,2	440	110	9	1,40
10	3,4	600	150	12	1,40
11	1,5	200	60	3	1,30
12	1,7	250	70	6	1,50
13	1,8	300	80	9	1,30
14	2,0	350	90	12	1,20
15	2,1	400	120	15	1,20
16	2,3	450	140	18	1,20
17	2,5	480	150	24	1,40
18	2,7	500	160	27	1,40
19	2,8	520	170	24	1,40
20	3,0	540	180	20	1,35
21	3,1	550	200	18	1,35
22	3,2	580	220	15	1,25
23	3,5	560	230	12	1,25
24	3,6	480	250	9	1,20
25	1,8	320	270	6	1,30
26	3,0	600	300	15	1,20
27	4,0	500	200	12	1,30
28	5,0	520	250	10	1,30
29	6,5	640	280	18	1,25
30	2,5	480	300	16	1,25
31	4,5	350	230	15	1,40
32	5,0	450	270	20	1,50
33	5,0	430	350	9	1,50
34	6,0	420	250	12	1,40
35	6,0	560	150	24	1,40
36	5,5	480	170	27	1,30
37	4,0	550	190	15	1,20
38	4,0	450	200	18	1,25
39	2,5	350	220	10	1,25
40	3,0	420	230	12	1,40
41	2,0	320	250	9	1,30
42	2,5	400	270	15	1,30
43	3,5	480	220	12	1,20
44	4,5	520	210	19	1,20
45	5,0	590	200	15	1,35
46	3,0	270	90	20	1,40
47	4,0	340	150	24	1,40
48	2,0	250	170	12	1,30
49	3,0	400	180	18	1,30
50	6,0	500	250	20	1,20

КЛАССИФИКАЦИЯ И СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Классификация транзисторов по их назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам, конструктивно-технологическим признакам, роду исходного полупроводникового материала находят своё отражение в системе условных обозначений их типов. В соответствии с возникновением новых классификационных групп транзисторов совершенствуется и система их условных обозначений, которая на протяжении последних 15 лет трижды претерпевала изменения.

Система обозначений современных типов транзисторов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.038–77 и базируется на ряде классификационных признаков.

В основу системы обозначений положен семизначный буквенно-цифровой код, первый элемент которого (буква для транзисторов широкого применения или цифра для приборов, используемых в устройствах общей техники) обозначает исходный полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен транзистор. Второй элемент обозначения – буква, определяющая подкласс транзистора, третий – цифра, определяющая его основные функциональные возможности (допустимое значение рассеиваемой мощности и граничную либо максимальную рабочую частоту). Четвёртый-шестой элементы – трёхзначное число, обозначающее порядковый номер разработки технологического типа транзисторов (каждый технологический тип может включать в себя один или несколько типов, различающихся по своим параметрам). Седьмой элемент – буква, условно определяющая классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

Стандарт предусматривает также введение в обозначение ряда дополнительных знаков, отмечающих отдельные существенные конструктивно-технологические особенности приборов.

Для обозначения исходного материала используются следующие символы (первый элемент обозначения):

Г или 1 – для германия или его соединений;

К или 2 – для кремния или его соединений;

А или 3 – для соединений галлия (практически для арсенида галлия, используемого для создания полевых транзисторов);

И или 4 – для соединений индия (эти соединения для производства транзисторов пока в качестве исходного материала не используются).

Для обозначения подклассов транзисторов используется одна из двух букв (второй элемент обозначения):

Т – для биполярных транзисторов;

П – для полевых транзисторов.

Для обозначения наиболее характерных эксплуатационных признаков транзисторов (их функциональных возможностей) используются применительно к двум их подклассам следующие символы (третий элемент обозначения), приведённые ниже. Для биполярных транзисторов:

1 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью не более 1 Вт и граничной частотой коэффициента передачи тока (далее – граничной частотой) не более 30 МГц;

2 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью не более 1 Вт и граничной частотой более 30, но не более 300 МГц;

4 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью не более 1 Вт и граничной частотой более 300 МГц;

7 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью более 1 Вт и граничной частотой не более 30 МГц;

8 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью более 1 Вт и граничной частотой более 30 МГц, но не более 300 МГц;

9 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью более 1 Вт и граничной частотой более 300 МГц.

Для полевых транзисторов:

1 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью не более 1 Вт и максимальной рабочей частотой не более 30 МГц;

2 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью не более 1 Вт и максимальной рабочей частотой более 30 МГц, но не более 300 МГц;

4 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью не более 1 Вт и максимальной рабочей частотой более 300 МГц;

7 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью более 1 Вт и максимальной рабочей частотой не более 30 МГц;

8 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью более 1 Вт и максимальной рабочей частотой более 30 МГц, но не более 300 МГц;

9 – для транзисторов с рассеиваемой мощностью более 1 Вт и максимальной рабочей частотой более 300 МГц.

Для обозначения порядкового номера разработки используются трёхзначные числа от 101 до 999, в качестве классификационной литеры используются буквы русского алфавита от А до Я, за исключением сходных по начертанию с цифрами букв З, О, Ч.

В качестве дополнительных элементов обозначения используются следующие символы: буква С после второго элемента обозначения для наборов в общем корпусе однотипных транзисторов (транзисторные сборки), не соединённых, как правило, электрически; цифра, написанная через дефис, после седьмого элемента обозначения для бескорпусных транзисторов; значение этой цифры соответствует следующим модификациям конструктивного исполнения:

1 – с гибкими выводами без кристаллодержателя (подложки);

2 – с гибкими выводами на кристаллодержателе (подложке);

3 – с жёсткими выводами без кристаллодержателя (подложки);

4 – с жёсткими выводами на кристаллодержателе (подложке);

5 – с контактными площадками без кристаллодержателя (подложки) и без выводов (кристалл);

6 – с контактными площадками на кристаллодержателе (подложке), но без выводов (кристалл на подложке).

Таким образом, современная система обозначений позволяет по наименованию типа получить значительный объём информации о свойствах транзистора.

Примеры обозначения некоторых транзисторов:

КТ2115А-2 – для устройств широкого применения кремниевый биполярный маломощный ($P_{\max} > 1$ Вт) высокочастотный ($30 \text{ МГц} < f_{cp} \leq 300 \text{ МГц}$), номер разработки 115, группа А, бескорпусный с гибкими выводами на кристаллодержателе;

2П7235Г – для устройств общетехнического назначения кремниевый полевой в корпусе мощный ($P_{\max} > 1$ Вт) низкочастотный, ($f_{\max} < 30 \text{ МГц}$), номер разработки 235, группа Г;

ГТ4102Е – для устройств широкого применения германиевый биполярный в корпусе маломощный ($P_{\max} < 1$ Вт), СВЧ ($f_{cp} \geq 300 \text{ МГц}$), номер разработки 102, группа Е.

Библиографический список

1. Прямишников, В. Н. Электроника. Полный курс лекций / В. Н. Прямишников. – 4-е изд. – Санкт-Петербург : КОРОНА принт, 2004. – 416 с. , ил.
2. Ягубов, З. Х. Физические основы электроники : учеб. пособие / З. Х. Ягубов. – Ухта : УГТУ, 2005. – 100 с. ; ил.
3. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : справочник / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, В. А. Прохоренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Беларусь, 1987.
4. Герасимов, В. Г. Основы промышленной электроники / В. Г. Герасимов. – М. : Высшая школа, 1985.
5. Горбачёв, Г. Н. Промышленная электроника : учеб. для вузов / Г. Н. Горбачёв, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. В. А. Лабунцова. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
6. Руденко, В. С. Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Киев : Высшая школа, 1985.
7. Транзисторы для аппаратуры широкого применения : справ. / под ред. Б. Л. Перельмана. – М. : Радио и связь, 1981. – 656 с. ; ил.
8. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. школа, 1982. – 496 с. ; ил.
9. Дементьев, И. А. Учебно-лабораторный практикум по дисциплине «Электроника». Ч. I : метод. указания / И. А. Дементьев, Л. П. Бойченко. – Ухта : УГТУ, 2013. – 36 с. ; ил.
10. Дементьев, И. А. Учебно-лабораторный практикум по дисциплине «Электроника». Ч. II : метод. указания / И. А. Дементьев, Л. П. Бойченко. – Ухта : УГТУ, 2013. – 44 с. ; ил.
11. Дементьев, И. А. Учебно-лабораторный практикум по дисциплине «Силовая электроника» : метод. указания / И. А. Дементьев, Л. П. Бойченко. – Ухта : УГТУ, 2013. – 50 с. ; ил.