

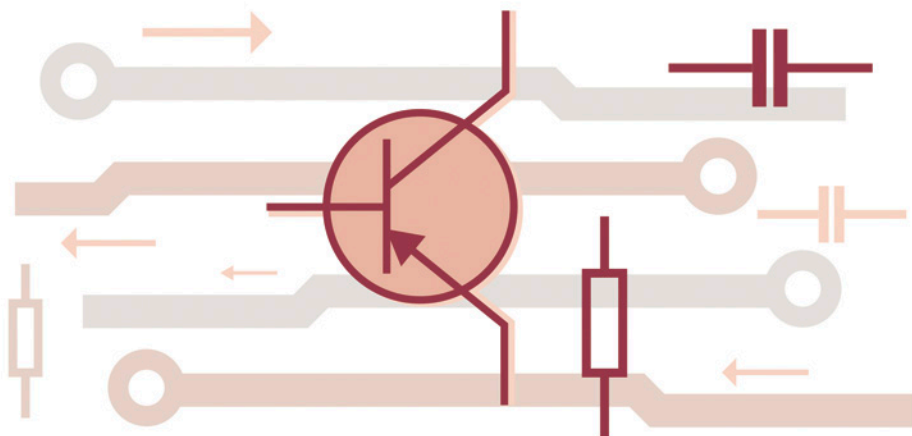
ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЦЕПИ

Биполярные транзисторы



*Базисные схемы
усилительных каскадов*

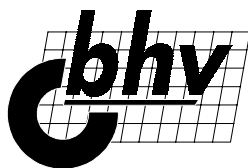
Межкаскадные связи



Константин Гомоюнов

ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЦЕПИ

*Допущено УМО по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлениям подготовки
бакалавров 552800 — "Информатика и вычислительная техника"
и специалистов 654600 — "Информатика и вычислительная техника"*



Санкт-Петербург

Дюссельдорф ♦ Киев ♦ Москва ♦ Санкт-Петербург

Последовательно и доступно изложена система понятий, без которой невозможно осмысленное изучение транзисторных цепей. Описаны трудности, возникающие при изучении электроники, и достижения тех гуманитарных наук, знание и применение которых способствуют их преодолению. Приведены рекомендации по выполнению упражнений и решению различных задач в процессе изучения транзисторных цепей.

Для студентов вузов и колледжей, преподавателей и инженеров

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зав. редакцией	<i>Анна Кузьмина</i>
Редактор	<i>Юрий Рожко</i>
Компьютерная верстка:	<i>Виктории Капецкой, Натали Смирновой</i>
Корректоры:	<i>Александр Моносов, Наталия Першакова</i>
Дизайн обложки	<i>Игоря Цырульников</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Рецензенты:

*профессор кафедры информационных и управляющих систем СПбГТУ,
доктор технических наук Т. К. Кракау,
доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций СПбГТУ, к.т.н. В. А. Сороцкий*

Гомоюнов К. К.

Транзисторные цепи. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002. — 240 с.: ил.

ISBN 5-94157-100-3

© К. К. Гомоюнов, 2002

© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2002

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 25.01.02.

Формат 70×100¹/₁₆. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,35.

Тираж 3000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 198005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Гигиеническое заключение на продукцию, товар № 77.99.1.953.П.950.3.99
от 01.03.1999 г. выдано Департаментом ГСЭН Минздрава России.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в Академической типографии "Наука" РАН.
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12.

Содержание

Глава 1. Качественные аспекты	7
§ 1. Что такое транзисторные цепи?	7
§ 2. Легко ли изучать транзисторную электронику?	9
§ 3. Элементы гуманитарных знаний, способствующие достижению понимания	14
3.1. Системный подход	14
3.2. Коммуникация	16
3.3. Предмет мысли	16
3.4. Понятие и термин	17
3.5. Определение (дефиниция)	18
3.6. Тирания формы	19
3.7. "Птичий язык"	19
3.8. Мысленная модель	20
3.9. Закон	21
3.10. Образное мышление и искусственная наглядность	21
§ 4. Усилитель	22
4.1. Общие сведения	22
4.2. Энергетический портрет усилительного каскада	24
4.3. Простейшая схема однокаскадного усилителя	26
4.4. Электрические цепи	27
4.5. Биполярный транзистор	28
4.6. Базисные схемы усилительных каскадов	31
§ 5. Межкаскадные связи	34
5.1. Общий вывод транзистора	34
5.2. Выходы усилительных каскадов	39
5.3. Входы усилительного каскада и транзистора	39
5.4. Замечание об использовании терминов <i>вход</i> и <i>выход</i> (транзистора, усилительного каскада, усилителя)	40
5.5. Правила построения межкаскадных связей	41
5.6. Два примера	43
§ 6. Образное представление о характеристиках	45
6.1. Традиционный метод снятия ВАХ	45
6.2. Наблюдение ВАХ на экране осциллографа	46
6.3. Статический и динамический режим	48
§ 7. Упражнения и задачи	50

Глава 2. Фрагменты теории электрических цепей.....	57
§ 8. Общие сведения.....	57
8.1. Понятие электрической цепи и ее состав.....	57
8.2. Изображение электрической цепи на бумаге.....	58
8.3. Электрические переменные.....	59
8.4. Направления отсчета напряжений и токов (правила знаков).....	60
8.5. Законы теории электрических цепей.....	61
8.6. Энергетические соотношения.....	65
8.7. Основные особенности структуры электронной цепи.....	66
8.8. Составление и решение системы уравнений.....	69
8.9. Границы применимости вышеизложенного.....	71
§ 9. Статический режим работы электрической цепи.....	72
9.1. Виды вольт-амперных характеристик двухполюсников.....	72
9.2. Управляемые двухполюсники. Трехполюсники.....	73
9.3. Большой и малый сигналы.....	75
9.4. Графический метод анализа.....	76
9.5. Метод малого сигнала.....	80
9.6. Схемы замещения. Идеальные двухполюсники.....	84
9.7. Кусочно-линейная аппроксимация характеристик и схемы замещения нелинейных двухполюсников.....	88
9.8. Структурирование и эквивалентные преобразования схем.....	92
9.9. Принцип (метод) суперпозиции (наложения).....	99
§ 10. Переходные процессы.....	100
10.1. Общие сведения.....	100
10.2. Схемы замещения с одним накопителем.....	101
10.3. Основные свойства экспоненты.....	111
10.4. Нелинейная задача.....	112
10.5. Операторный метод анализа переходных процессов.....	116
10.6. Парадоксальный пример.....	125
10.7. Дуальность.....	127
§ 11. Биполярные транзисторы.....	128
11.1. Общие сведения.....	128
11.2. Статические характеристики транзистора.....	130
11.3. Кусочно-линейная аппроксимация характеристик и полносигнальная схема замещения транзистора.....	132
11.4. Малосигнальные параметры и схема замещения транзистора.....	135
11.5. Зависимые двухполюсники.....	139
11.6. Семейства характеристик транзистора, снятые при включении по схеме с ОБ.....	139
11.7. Построение выходной характеристики транзистора.....	140
11.8. Поведение транзистора в динамическом режиме.....	141
11.9. Униполярные (полевые) транзисторы.....	144

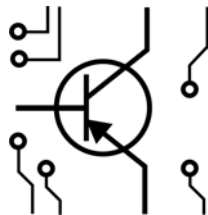
Глава 3. Количественные аспекты	147
§ 12. Общие соображения	147
12.1. Аналоговые и цифровые элементы	147
12.2. Подход к анализу статического режима	149
§ 13. Статический режим усилительного каскада с ОЭ	151
13.1. Ожидаемый вид ХПН	153
13.2. Построение ХПН графическим методом	153
13.3. Области работы транзистора в усилительном каскаде	157
13.4. Характеристика передачи напряжения нагруженного усилительного каскада	158
13.5. Анализ схем замещения, содержащих вентили	162
13.6. Получение ХПН аналитическим методом	167
§ 14. Статический режим усилительных каскадов с ОБ и ОК	169
14.1. Построение ХПН УК с ОБ графическим методом	169
14.2. Получение ХПН УК с ОБ аналитически	173
14.3. Построение ХПН УК с ОК	175
14.4. Схема замещения УК с ОК	177
14.5. Эмиттерный повторитель	179
14.6. Идентификация состояния и области работы транзистора	180
§ 15. Коэффициенты передачи тока, напряжения и мощности	183
15.1. Определения	183
15.2. Коэффициенты передачи УК с ОЭ	184
15.3. Коэффициенты передачи УК с ОБ	186
15.4. Коэффициенты передачи УК с ОК	188
15.5. Обратная связь в усилителе	189
§ 16. Мультивибратор	196
Послесловие. Метод восхождения от абстрактного к конкретному	205
Приложение 1. Динамические системы	207
Состав динамических систем	209
Межэлементные аналогии	211
Межсистемные аналогии	215
Обобщение	218
Ответы на вопросы	219
Литература	221
Приложение 2. Подключение источников питания и измерительных приборов	223
Литература	229
Предметный указатель	230

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

- ❑ Учебное пособие состоит из введения, трех глав, разделенных на 16 параграфов, послесловия, списка литературы, предметного указателя и двух приложений. Для удобства ссылок нумерация параграфов сплошная.
- ❑ Номера рисунков и таблиц состоят из двух элементов, разделенных точкой. Первый элемент — номер главы, второй — номер рисунка или таблицы в главе.
- ❑ Нумерация формул в каждом параграфе своя.
- ❑ Имена имен (терминов) выделены курсивом. Например: "*Резисторный элемент* есть термин, которым обозначают простейшую мысленную модель резистора", "*Электрон* — имя существительное".
- ❑ В тех случаях, когда могут возникнуть сомнения, имена понятий выделены одиночными кавычками. Например: "'Физическая величина' — понятие, предмет из мира идей".
- ❑ Кавычками выделены:
 - выдержки (цитаты);
 - иносказательные выражения;
 - примеры предложений (как это сделано в пункте 4 и 5).
- ❑ Жирным шрифтом выделены важные мысли или вновь вводимые термины.
- ❑ Цифры в обозначениях реальных элементов на схемах электрических цепей и в тексте — такого же размера, как буквы. Например, "резистор R_1 ". Цифры в обозначениях соответствующих им идеальных элементов на схемах замещения и их параметров в формулах указаны в виде нижних индексов. Например, " R_1 — резистивный элемент", " R_1 — сопротивление резистора R_1 ".
- ❑ Аббревиатуры:
 - ВАХ — вольт-амперная характеристика
 - ОБ — включение транзистора с общей базой

- ОК — включение транзистора с общим коллектором
- ООС — отрицательная обратная связь
- ОС — обратная связь
- ОЭ — включение транзистора с общим эмиттером
- ПОС — положительная обратная связь
- УК — усилительный каскад
- ХПН — характеристика передачи напряжения

ВВЕДЕНИЕ



В 1947—48 учебном году я прослушал курс общей радиотехники с лабораторным практикумом. Лекции читал квалифицированный специалист. Получил пятерку. Но чувствовал, что ничего не понимаю. Это было непривычно: во-первых, учиться я умел (в школе — отличник, в институте — Сталинский стипендиат), во-вторых, имел практический опыт работы с электричеством (в школьные годы — в лаборатории электротехники Ленинградского дворца пионеров, затем два года работы электромонтером и год хромировщиком на Уралмашзаводе). Курс общей электротехники, прослушанный годом раньше, не вызвал никаких затруднений. Ощущение непонимания подтвердилось: в следующем году в лаборатории мне понадобился несложный усилитель, но разработать его самостоятельно я не смог.

Спустя год — в 1949—50 учебном году — мне посчастливилось прослушать курс Алексея Михайловича Бонч-Бруевича (сына легендарного руководителя Нижегородской радиолaborатории). И тут я почувствовал, что начал понимать электронные устройства.

Можно было подумать, что "количество перешло в качество". Однако вот впечатление дипломника физико-механического факультета Ю. Головина, радиолюбителя, учившегося 20 лет спустя: "В то время нам в третий раз взялись читать курс радиотехники... Начались лекции Бонч-Бруевича, и я удивлялся, зачем перед этим нас путал Х и распутывал Y: дали бы сразу Б.-Бруевича!" Аналогичной была реакция дипломницы той же группы Т. Штукиной: "После курса Бонч-Бруевича я перестала бояться радиотехнику".

Ощущение понимания тоже вскорости подтвердилось практически: при выполнении дипломной работы оказалось необходимым разработать импульсный генератор, что я и сделал, не прибегая к посторонней помощи. Впоследствии я занимался и эксплуатацией, и разработкой электронных устройств (см., например, [II]), а в 1957 г. предложил поставить совершенно новый тогда курс элементов цифровых электронных вычислительных машин (лекции, лаборатория, упражнения).

Начав преподавать, я, естественно, размышлял о различной доступности для понимания двух упомянутых выше курсов и пришел к выводу, что все дело в их направленности и стиле преподавания. В первом курсе основное внимание уделялось количественной, вычислительной стороне, во втором — качественной, осмыслению процессов в электронных цепях¹.

¹ Различие между концепциями и вычислениями было замечено еще Энгельсом. Он, например, писал, что "вычисления отучили механиков от мышления" (см. [2]).

Читая учебники, я обнаружил, что многие темы изложены непонятно, а подчас и неправильно. Непонимание авторами качественной стороны вопроса часто маскируется обилием формул. С тех пор главной моей заботой стало создание учебных текстов, свободных от ошибок, противоречий и пробелов, и тем самым доступных для понимания лицам, начинающим изучать электронные цепи.

В дальнейшем стало ясно, что проблема понимания свойственна не только электронике, но и другим наукам, даже самой древней и самой наглядной — механике. Со временем работа над этой проблемой вылилась в новое научное направление [3—5]. Опираясь на развиваемые идеи, я продолжаю совершенствовать курс электроники. Предлагаемая вашему вниманию книга — некоторый итог поисков в данном направлении. Перечислю основные принципы, которыми я руководствуюсь.

Главное — так уяснить себе самому и изложить материал, чтобы он оказался доступным для понимания каждому окончившему среднюю школу (естественно, стремящемуся понять). Все остальное — средства достижения этой цели:

□ В области методологической и теоретической:

- Устранение сущностных ошибок, противоречий и пробелов; создание целостной системы однозначно связанных между собой и обуславливающих друг друга понятий.
- Обеспечение сказанного в предыдущем пункте путем обращения к гуманитарным знаниям, предметом которых является мышление и язык человека. Усвоение их облегчает понимание нового материала и преодоление уже сложившихся при обучении в средней школе заблуждений и стереотипов мышления, а также способствует выработке рефлексии — способности человеческой психики к сознательному изучению, осмыслению, оцениванию и преобразованию собственных эмоций, мыслей и действий.
- Применение простейших мысленных моделей, позволяющих получить верный результат в первом приближении.
- Четкое различение качественной (понятийной, концептуальной) и количественной (вычислительной) сторон изучаемого материала, а также демонстрация тесной связи между ними.
- Подчеркивание определяющей роли нелинейности характеристик полупроводниковых элементов в работе транзисторных цепей.
- При введении основополагающих понятий и законов применение операциональных формулировок, обеспечивающих осознание однозначной связи теории с практикой.

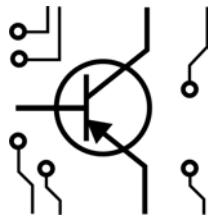
□ В области методической:

- Опора на устойчивые личные знания учащихся.
- Изложение материала сравнительно небольшими дозами, в пределах которых овладение системой новых понятий — не безнадежная попытка.
- Исключение "обоснований" типа "легко увидеть, что..." в тех случаях, когда это совсем не легко.
- Использование графического языка как средства "искусственной наглядности".

Я благодарен Борису Дмитриевичу Грачеву, Валентину Сергеевичу Гутникову, Татьяне Константиновне Кракау, Юрию Ивановичу Лыпарю, Владимиру Александровичу Сороцкому, Галине Юрьевне Сотниковой и Мансуру Акмеловичу Шакирову, прочитавшим рукопись и высказавшим полезные замечания.

Отзывы, замечания и пожелания прошу посылать по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, Санкт-Петербургский государственный технический университет, методический отдел, К. К. Гомоюнову.

ГЛАВА 1



Качественные аспекты

§ 1. Что такое транзисторные цепи?

Область использования электромагнитных явлений в человеческой практике чрезвычайно широка. Большое место в ней занимают электрические цепи (см. гл. 2). В 1906 г. Ли де Форрест изобрел трехэлектродную электронную лампу — триод. Оказалось, что устройства с лампами тоже можно рассматривать как электрические цепи. Однако цепи с лампами и по назначению, и по некоторым специфическим особенностям функционирования довольно сильно отличаются от "сильноточных" электрических цепей. В связи с этим в качестве имени цепей, в которых главными элементами являются электронные приборы, появился термин "электронные цепи". В шестидесятых годах XX века вакуумные электронные приборы были вытеснены полупроводниковыми приборами, основными среди которых являются транзисторы. Так появились названия **транзисторная электроника** и **транзисторные цепи**, часто используемые как синонимы.

Слово *электроника* используют и самостоятельно, и в различных словосочетаниях, например: радиоэлектроника, электроника твердого тела, физическая электроника, эмиссионная электроника, промышленная электроника, электронная техника, электронная промышленность, электронные приборы, электронные цепи, электронные устройства и т. д. Проанализировав различные тексты, в которых встречаются слова *электроника*, *электронный*, мы обнаружим, что их используют в терминах, по меньшей мере, трех групп понятий.

В первую группу входят разделы физики, изучающие процессы движения электронов и ионов в вакууме, газе, твердом теле и на границе этих сред (например, физическая электроника).

Вторую группу образуют основанные на этих разделах физики прикладные дисциплины, имеющие своим предметом теорию и принципы построения электронных приборов — транзисторов, диодов и т. п., а также сами эти приборы и промышленность, их производящая (например, полупроводниковая электроника, электронная промышленность).

В третью группу входят понятия, относящиеся к применению электронных приборов в различных промышленных и бытовых устройствах, а также соответствующие прикладные дисциплины (например, промышленная электроника, теория электронных цепей).

До войны и в первые послевоенные годы в ходу были термины *радио* и *радиотехника*, а не *электроника* или *радиоэлектроника*. Соответственно и основную учебную дисциплину называли "радиотехникой". Обусловлено это тем, что первоначально (до изобретения триода) электромагнитные волны использовали для передачи сообщений телеграфными знаками, и появился термин "радиотелеграф" (от латинского *radius* — луч). Затем с использованием ламп оказалась возможной "радиотелефония" — передача не символов, а звуков. В довоенные годы подавляющую часть электронной аппаратуры производили для радиосвязи и радиовещания. Постепенно, однако, электронные лампы стали все шире использовать в приборах для физических измерений, в автоматике и вычислительной технике. Иными словами, развилась обширнейшая область применения электронных приборов, не связанная с "выходом в эфир" (излучением и приемом радиоволн), т. е. "электронные цепи". Термин *радио* сохранил свое значение. Им называют все, связанное с излучением, распространением и приемом радиоволн (радиосвязь, радиовещание, радиолокация, радионавигация, радиоастрономия и т. п.).

Технологию производства электронных устройств все время совершенствовали — уменьшали размеры компонентов, повышали их надежность и долговечность. Однако долгое время характер производства сохранялся неизменным: резисторы, конденсаторы, электронные лампы изготавливали в виде отдельных конструктивных единиц. Лампы вставляли в так называемые ламповые панельки, а остальные детали припаивали к металлическим лепесткам, закрепленным на пластинах (платах), изготовленных из изолятора. Лепестки и ламповые панельки соединяли между собой проводами в соответствии с принципиальной схемой.

В дальнейшем появились так называемые печатные платы. Это — тонкие (1—2 мм) пластины из изолятора, на поверхности которых "напечатана" в виде полосок из медной фольги схема соединений компонентов. Детали припаивали непосредственно к печатной плате. И сами платы, и припайвание к ним элементов производились автоматами.

Постоянным было стремление к миниатюризации электронных устройств и автоматизации их производства. Существенное изменение произошло в пятидесятые годы XX века с изобретением и налаживанием массового производства транзисторов — ими заменили электронные лампы. Резко снизились размеры электронных устройств, их масса, энергопотребление, повысилась надежность. Но поистине революционными оказались шестидесятые годы. Тогда в приповерхностном слое и на поверхности миниатюрной пла-

стинки из кремния (площадью порядка 1 мм^2) начали изготавливать в едином технологическом цикле полностью готовое устройство, содержащее транзисторы, резисторы и диоды вместе с соединениями между ними.

Эта технология получила название **интегральной**, а сами устройства — **интегральными микросхемами** (ИМС).

Замечание

Из-за пренебрежительного отношения к точности языка "схемой" называют как условное графическое изображение электронного устройства на бумаге, так и само устройство.

Появились также термины *микроминиатюризация*, *микроэлектроника*. Чрезвычайно быстро происходило уменьшение размеров компонентов микросхем, увеличение степени интеграции, понижение стоимости. Вначале ИМС содержали единицы компонентов, потом десятки, сотни, тысячи, миллионы. Появились термины *большая интегральная схема* (БИС), *сверхбольшая интегральная схема* (СБИС). В настоящее время технология достигла такого совершенства, что наряду с устройствами средней интеграции и БИС изготавливают ИМС, содержащие на кристалле площадью 1 см^2 миллионы транзисторов, т. е. линейные размеры транзисторов уменьшились до единиц микрометра (10^{-6} м).

Сравнительно недавно появился термин *нанозлектроника*. По аналогии с термином *микроэлектроника* можно подумать, что так называют интегральные микросхемы, размеры компонентов которых составляют порядка 10^{-9} м . Однако таких ИМС, во всяком случае пока, нет. Уменьшение их размеров продолжается, но традиционным, эволюционным путем. Термин *нанозлектроника* используют для обозначения исследований и разработок в области таких полупроводниковых структур, внутри которых имеются упорядоченные неоднородности размером порядка нанометра. Используют их для производства не ИМС, а эффективных источников света, в том числе лазеров, и создания элементов, в которых световой поток управляется электрическим полем.

§ 2. Легко ли изучать транзисторную электронику?

Познакомимся с мнением профессионалов. И. С. и А. А. Лебедевы пишут: "Практика показывает, что инженеры в области микроэлектроники обладают двумя видами знаний — формальными и интуитивными... Большинство задач, возникающих в повседневной деятельности инженера, решается интуитивными (эвристическими) приемами, которые являются неформальными и возникают как бы из опыта его работы... На пути обучения студентов

эвристике возникает серьезная проблема: поскольку эти знания не формализованы, их практически невозможно передать, и богатейший опыт, накопленный каким-либо инженером, в самой важной его части остается для окружающих (обучаемых) недоступным плодом. Обучение же студентов в большинстве случаев сводится к **рассмотрению большого количества схем формальными методами в надежде, что таким образом накопится необходимый опыт и разовьется интуиция**. Недостатки существующего (традиционного) подхода очевидны:

- ❑ большое количество времени, сил и средств, требуемых для подготовки инженеров средней квалификации;
- ❑ отсутствие всякой гарантии, что за время обучения желаемая цель будет достигнута;
- ❑ отсутствие даже намеков на подход к важнейшей проблеме — синтезу схем" [6, с. 12—13].

Замечание

Общей теории структурного синтеза схем пока еще действительно не создано, однако работы в этом направлении успешно ведутся (см., например, [7]).

Зададимся вопросом: подобные трудности свойственны изучению только электроники? Оказывается, отнюдь нет. Известный английский ученый, изобретатель и деятель образования Э. Лейтуэйт с огорчением констатирует, что, умея с легкостью решить любую экзаменационную задачу повышенной сложности по физике, он не в состоянии обучить этому умению восемнадцатилетних школьников. **"Остается только надеяться, — пишет Лейтуэйт, — что они приобретут сноровку, постоянно практикуясь в решении задач"** [8, с. 127].

Обратим внимание на выделенные мной слова. Как Лебедевы, так и Лейтуэйт **выражают надежду**, что учащиеся как-то "выкрутятся" сами. Многолетняя практика показывает, что удастся это далеко не всем.

Очевидно, налицо какие-то общие факторы, затрудняющие изучение разных дисциплин. Постараемся уяснить главное.

Советский физик академик Н. Н. Андреев (1880—1970) в заметке "Наука в моей жизни", написанной в 1962—1963 гг., вспоминает, что первая же геометрическая теорема поставила его в тупик. Он выучил теорему наизусть, но она оставалась непонятной. Он думал о ней везде — на прогулках, за обедом, на уроках по другим предметам. Наконец, на третий или четвертый день мучений на прогулке он вдруг почувствовал, что ему стало все ясно, и что понимать-то, собственно говоря, было нечего. Далее автор пишет: "До сих пор не могу объяснить себе этого психологического переворота, в последующей моей научной жизни я несколько раз испытывал подобные же трудности и также не могу объяснить, как я их преодолел" [9, с. 176—177].

Американский кибернетик и специалист по искусственному интеллекту Э. Фейгенбаум писал: "По опыту нам известно, что большая часть знаний в конкретной предметной области остается личной собственностью эксперта. И это происходит не потому, что он не хочет разглашать своих секретов, а потому, что он не в состоянии сделать этого — ведь эксперт **знает гораздо больше, чем сам осознает**" (цитата [10, с. 12], выделено мной. — К. Г.).

Приведенные и другие многочисленные факты свидетельствуют о том, **что наш мозг располагает двумя моделями мира — осознанной и неосознанной** (подробнее см. [4, ч. I, § 2]). Неосознаваемая модель мира играет решающую роль во всякой творческой работе. **Интуитивное (эвристическое) решение — не что иное, как осознанный продукт работы неосознаваемой модели.** Неосознаваемая модель мира в психике специалиста формируется преимущественно в процессе профессионального становления. Все нестандартные решения, противоречащие стереотипным, порождаются ею. Как это происходит, никто не знает. Человек, выработавший новое решение, не может точно воспроизвести ход мысли, т. к. процесс в своей определяющей успех части был неосознанным. В результате оказывается, что общая картина представляет собой мозаику из осознанных и неосознанных участков, причем о наличии вторых специалист обычно не догадывается. Такое описание, содержащее противоречия, пробелы, а иногда и существенные ошибки, нередко попадает в учебники. Каких-либо алгоритмов поиска неосознанных участков в рассуждениях не существует. Известно лишь, что важнейшее значение для их преодоления имеет как можно более точная формулировка задачи.

Второй психологический фактор, затрудняющий изучение любой дисциплины, заключается в следующем. Если человек овладевает чем-то для него совершенно новым, его успехи всегда характеризуются зависимостью, показанной на рис. 1.1. Это очевидно в отношении освоения движений (плавание, езда на велосипеде, упражнения на гимнастических снарядах и т. п.). Но то же самое происходит и при изучении любой науки. Вначале (иногда очень долго) результат оказывается нулевым (некоторым учащимся даже не удается за отведенное время преодолеть "психологический порог"). Состояние человека (слева или справа от порога) легко оценивается как субъективно, так и объективно. Учащийся, не преодолевший порог, боится изучаемой дисциплины, а "находящийся справа" уверен в своей способности ее понять. Объективный контроль также прост. Человек, находящийся слева, способен лишь воспроизводить заученное, а перешедший в правую область — решать субъективно новые задачи, т. е. порождать алгоритмы решения, не приведенные в учебнике или на занятии.

Во время латентного периода (то есть левее порога) в мозгу складывается так называемая функциональная система, которая, будучи сформирована, и управляет деятельностью, осваиваемой человеком. Что же составляет ее основное содержание в случае изучения теории?

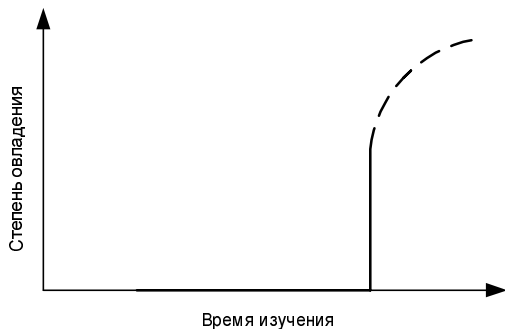


Рис. 1.1

Вы должны овладеть системой понятий и способами оперирования ими. К сожалению, понятия невозможно изучать по отдельности. Понятие — знание, мысль о некотором предмете. Так как свойства любого предмета обнаруживаются только при его взаимодействии с другими предметами, сущность понятия раскрывается в форме множества суждений, в которых оно связано с другими понятиями, принадлежащими к той же системе. Это утверждение относится к **каждому** понятию, входящему в данную систему. Следовательно, изучить можно только одновременно какое-то множество понятий. Количество возможных парных связей между любыми объектами практически пропорционально квадрату их числа (точнее, $m = n(n-1)/2$, где m — число связей; n — число объектов). Поэтому трудность формирования функциональной системы быстро возрастает с увеличением количества понятий, которыми надо овладеть.

Обе названные выше причины затруднений в понимании — психологические. Достаточно ясно, что уже просто знание об их существовании может облегчить изучение любого материала хотя бы потому, что у вас не сложится заниженное представление о своих умственных способностях. Однако, кроме психологии, мышление и язык человека изучают и другие гуманитарные науки — диалектика, логика, теория определений, семиотика (теория знаковых систем), языкознание, терминоведение, а также пограничные, например, психолингвистика (теория речевой деятельности). Знание их основных достижений также способствует пониманию изучаемого материала. *Некоторые из них рассмотрены в § 3 — в частности, в п. 3.1 представлена третья общая причина затрудненного понимания.*

Сказанное относится к изучению любых дисциплин. Однако в овладении транзисторными цепями встречаются специфические трудности. Остановимся на основных.

□ В отличие от механических, электрические процессы непосредственно не наблюдаемы. Мы не видим ни электромагнитного поля, ни электрического тока. О том, что происходит в электрической цепи, мы судим по показаниям измерительных приборов (в первую очередь вольтметров,

амперметров и осциллографов). Поэтому, изучая электронные цепи, необходимо привыкать к "искусственной наглядности" — языку принципиальных электрических схем, вольт-амперных и других характеристик, семейств характеристик, временных диаграмм, схем замещения и т. п. (*подробнее об этом см. в п. 3.10*).

- Вторая специфическая трудность изучения транзисторных цепей обусловлена тем, что физики перестали интересоваться электрическими цепями полтора-два столетия назад. Теорию электрических цепей развивают электрики и электронщики. Но авторы учебников физики, видимо, считают ниже своего достоинства интересоваться их достижениями. В результате более уродливое изложение материала об электрических цепях, чем то, которое мы видим в учебниках физики, трудно себе представить. Например, в учебнике для VIII класса сказано, что закон Ома является "одним из основных физических законов". По современным представлениям закон Ома для участка цепи — простейшая математическая модель резистора, а закон Ома для полной цепи — ответ к элементарной задаче о цепи, содержащей два элемента — источник и приемник, при условии, что допустимо использовать линейную аппроксимацию характеристик обоих элементов.

Уравнения Кирхгофа во всех учебниках физики названы "правилами, облегчающими вычисление токов в разветвленных цепях", в то время как они являются структурными законами теории электрических цепей. Формулировки же их столь архаичны, что для анализа транзисторных цепей непригодны.

- Неудачные утверждения встречаются и в учебниках по теории электрических цепей. Одно из них имеет принципиальное значение. Любая теория нужна людям, в конечном счете, для правильной организации практических (предметных) действий. Поэтому **правила сопоставления теоретических утверждений с практикой являются важнейшей составной частью теории**. По самому смыслу этих правил очевидно, что в них наряду с именами теоретических понятий должны присутствовать названия предметов из мира вещей. Однако о стрелках, наносимых на электрические схемы для их анализа, пишут, что они показывают "условно-положительные направления напряжения и тока". Как видим, в этой формулировке имена предметов из мира вещей отсутствуют, т. е. она не соответствует названному выше методологическому требованию — и, следовательно, руководствуясь ею, мы не можем сопоставлять знаки переменных в формулах с показаниями измерительных приборов.
- Неполная осознанность процессов в усилительном каскаде привела к следующим недостаткам объяснения его работы.
 - Не выявлены две базисные схемы усилительных каскадов — последовательная и параллельная.

- В течение десятилетий (со времен ламповой техники) в учебниках неверно объяснено назначение коллекторного (прежде анодного) резистора. В частности, этот резистор называют коллекторной (анодной) нагрузкой, в то время как он — вспомогательный элемент, предназначенный для ограничения тока, а нагрузкой данного усилительного каскада является вход следующего каскада.
- Неправильно указан физический смысл так называемой нагрузочной характеристики (в ламповую эпоху ее называли "динамической характеристикой лампы", хотя к лампе она никакого отношения не имеет).

§ 3. Элементы гуманитарных знаний, способствующие достижению понимания

Важнейшими качествами личности являются стремление и способность к научному пониманию. Они вырабатываются в процессе многократного достижения понимания при обучении в школах всех ступеней. Достижение понимания во многих случаях затруднено наличием в учебниках сущностных ошибок, противоречий и пробелов. Их преодолению способствует знание результатов тех гуманитарных наук, которые изучают мышление и язык человека. Краткие сведения об основных элементах этих знаний изложены в данном параграфе; часть из них приведена в основном тексте и в приложениях (более полно и систематично этот материал представлен в монографиях [3, 4] и в учебном пособии [5]). Постарайтесь овладеть этими гуманитарными знаниями. Они помогут вам в понимании не только транзисторных цепей, но и материала других наук, т. к. позволят правильно задавать вопросы себе самим и преподавателям.

3.1. Системный подход

В последние десятилетия системный подход становится важнейшей методологической концепцией. Основная идея системного подхода чрезвычайно проста. Почти каждый объект является и системой, и элементом (компонентом, подсистемой). Например, атом — система, состоящая из ядра и электронов, служащих его элементами. Вместе с тем, атом — элемент системы "молекула". Учебная группа — система, состоящая из студентов, и элемент системы "курс" и т. д. Почти всюду наблюдается "иерархия" ("пирамида", "лестница") систем. Каждый объект, принадлежащий к некоторой ступени, является системой по отношению к "нижележащим" объектам и элементом объекта, "расположенного этажом выше".

Из этого факта следуют важнейшие выводы. Остановимся на двух, имеющих непосредственное отношение к изучению транзисторных цепей.

1. Каждый объект можно изучать либо как элемент, либо как систему.

В первом случае мы интересуемся только его **поведением** и не обращаем

внимания на его внутреннее устройство. Такой подход именуют **феноменологическим, функциональным** и т. п., а изучаемый объект — "**черным ящиком**". Если мы изучаем объект как систему, то, напротив, узнаем, из каких элементов он состоит, и какова его структура, т. е. каковы связи между элементами. Этот подход называют **механизмическим, структурным, субстанциональным** и т. п., а объект — "**прозрачным ящиком**".

2. В соответствии со сказанным законы делят на **компонентные** (элементные) и **структурные** (системные, топологические). Первыми описывают поведение элементов, и они не зависят от места, занимаемого элементами в системе. Вторые же определяются только структурой и безразличны к тому, какие именно элементы входят в ее состав. Например, компонентным является закон Ома для участка цепи, а системными — уравнения Кирхгофа.

К сожалению, либо системный подход незнаком авторам учебников физики, либо они его игнорируют, что неблагоприятно сказывается на формировании стиля мышления учащихся. Суть дела в следующем. Развиваясь, физика все более углубляется в **механизмы** явлений. Это генеральное направление очень точно сформулировал Резерфорд: "Доискивайтесь первоосновы вещей". Данная идея оказалась руководящей и для учебной дисциплины "Физика". В результате все курсы физики построены так, что в процессе их изучения у читателей создается впечатление, будто "единственно научным" является механизмический подход. Отсюда вытекает так называемый "герменевтический круг": целое нельзя понять, если неизвестны механизмы действия его элементов, а элементы невозможно изучать, пока не выяснено их назначение в составе целого¹. В действительности людям, использующим физические знания в своей профессиональной деятельности, не только нет необходимости "доискиваться первоосновы вещей", но это еще и вредно, т. к. отвлекает внимание от решения их конкретных задач.

При изучении электроники "герменевтический круг" проявляется очень четко. Услышав, что основным элементом технических средств информатики является усилитель, а основным элементом усилителя — транзистор, учащиеся решают, что они ничего не поймут, т. к. не знают ни целого (усилитель), ни его основного элемента (транзистор).

С позиций системного подхода легко понять, как преодолевают "герменевтический круг": при изучении системы не требуется механизмическое понимание ее элементов. Необходимо знать лишь закономерности их поведения. А закономерности поведения задаются характеристиками — взаимосвязями переменных (вспомним: никого не волнует вопрос, **почему** поведение резистора описывают формулой $u = Ri$).

¹ Герменевтика — наука о понимании и толковании текстов.

Чтобы помочь студентам преодолеть "комплекс неполноценности", вызванный ложной мыслью, будто все надо знать механически, на занятиях я предлагаю им начертить схематически в разрезе водопроводный кран. С этим заданием справляется в лучшем случае один человек из группы. Тогда я говорю: "Вот видите: вы не знаете, как устроен водопроводный кран. Это мешает вам им пользоваться?... Относитесь так же к транзистору!"

3.2. Коммуникация

Принято считать, что в процессе коммуникации (общения) люди обмениваются мыслями. Это неверно. Мысли каждого человека сугубо индивидуальны и непосредственно недоступны другим людям. Чтобы мысли автора сообщения могли воздействовать на реципиента (адресата, получателя сообщения), он (автор) **объективирует** их — представляет (выражает) в материальной форме на естественном или искусственных языках (языках математических символов, графиков, чертежей, схем и т. п.). В пространстве между коммуникантами существуют не мысли, а звуковые волны или бумага со следами чернил, т. е. речевые (знаковые) конструкции. Они служат сигналами, вызывающими в сознании адресата появление собственных мыслей, неизбежно отличающихся от мыслей автора сообщения. Чтобы отличие оказалось несущественным, адресат должен разобраться в грамматической форме и логике сообщения и уяснить, в каких значениях автор использует все термины.

3.3. Предмет мысли

Очень важно понять, что может служить содержанием сообщения, т. е. **предметом мысли**. Мы способны размышлять об **объективной реальности** — окружающем нас мире, **субъективной (психической) реальности** — собственном внутреннем мире, **мире языков (знаков)**, которыми мы объективируем (представляем, выражаем) мысли и чувства, и отношениях между ними. Внутренний мир человека принято делить на рациональную (идеи) и эмоциональную (чувства) сферы. Поскольку мы обсуждаем процесс изучения объективной реальности, эмоциональной сферы касаться не будем. Таким образом, **термин предмет мысли есть имя универсального множества, подмножествами которого являются мир вещей, мир идей, мир знаков (языков) и отношения между ними**. Соответственно термины (слова или словосочетания) могут быть именами вещей, именами идей, именами имен (шире — знаков) и именами отношений. Необходимо научиться осознавать в каждом конкретном случае, о чем идет речь. Это не всегда просто, т. к. один и тот же термин в разных контекстах может служить именем предметов, принадлежащих разным подмножествам. Вот простейший пример. В предложении "Атом водорода содержит один электрон" слово *электрон* является именем предмета из мира вещей. В предложении "Электрон и дырка — важнейшие

понятия теории полупроводников" оно служит именем понятия, т. е. предмета из мира идей. Наконец, в предложении "Электрон — имя существительное" речь идет о **слове** *электрон*, т. е. в данном случае *электрон* — имя имени, предмета из мира знаков.

Издавна принято имена имен выделять курсивом или кавычками (третий пример был бы написан так: "*Электрон* — имя существительное" или "«Электрон» — имя существительное"). К сожалению, имена идей выделять не принято, что нередко приводит к неправильному пониманию. В тех случаях, когда такая опасность существует, я выделяю имена идей одиночными кавычками (например: "'Электрон' и 'дырка' — важнейшие понятия теории полупроводников").

3.4. Понятие и термин

Многие авторы полагают (что видно из написанного ими), будто *понятие* и *термин* — синонимы. Это — грубая ошибка. Данные слова служат именами разных предметов мысли: понятие — знание, предмет из мира идей; термин — слово или словосочетание, предмет из мира знаков. Различие между ними примерно такое же, как различие между содержанием характеристики человека и его именем.

Сущность понятия раскрывается в форме множества суждений, в которых оно связано с другими понятиями. Поэтому понятие объективировано (выражено, представлено) в виде множества предложений, выражающих эти суждения. Термин же представлен в форме слова или устойчивого словосочетания. Существует наука — терминоведение, изучающая сами термины и их системы. К сожалению, ее рекомендации используются слабо, ввиду чего имеется много недостатков, препятствующих пониманию текстов. Прежде всего это **многозначность** — явление, состоящее в том, что один и тот же термин используют для обозначения разных предметов мысли. В обыденной речи это явление тоже распространено, но каждый человек, руководствуясь личным жизненным опытом, легко понимает, о чем идет речь. Например, когда говорят, что "утонувшее в колодезе ведро достали кошкой", каждый понимает, что речь идет о миниатюрном якоре, а не о животном. Однако личного научного опыта у вас пока нет, и многозначность приводит к недоумениям. Средством их преодоления служит контекстуальное определение (см. п. 3.5).

Вторая особенность терминов, заметно влияющая на понимание, состоит в том, что они бывают правильно ориентирующими, нейтральными (безразличными) и дезориентирующими. Значение первых можно хотя бы приблизительно понять, анализируя состав слова (например, *самолет*). Вторые не дают никаких указаний (например, *рычаг второго рода*). Наконец, третьи наводят на ложную мысль (например, термин *реальный трансформатор* заставляет думать, будто речь идет о вещи, тогда как им называют одну из мысленных моделей трансформатора).

3.5. Определение (дефиниция)

В литературе встречаются словосочетания "определение понятий" и (значительно реже) — "определение терминов".

Так как коммуниканты должны одинаково понимать значения слов, необходимо адекватное средство. Поэтому определение (дефиниция) — процедура любого характера, благодаря применению которой становится известным значение слова. Если оно служит именем понятия, определением одновременно вводится понятие.

Главное заблуждение, бытующее в литературе по поводу определений, состоит в том, что единственной "законной" дефиницией считается вербальное (чисто словесное) определение через род и видовое отличие (иначе называемое классификационным). Отсюда, в частности, следует ложная мысль "первичные понятия не определяются".

Знания, в конечном счете, нужны людям для того, чтобы успешно действовать в мире вещей. Поэтому все первичные понятия, т. е. абстракции "первого слоя", предметы из мира идей, наиболее близкие к миру вещей, в любой науке должны определяться невербально (не чисто словесно). Понятия следующих уровней абстрагирования определяют вербально, путем обобщения. Известно два вида невербальных определений — **остенсивное** (наглядное) и **операциональное**. Остенсивным называют определение, состоящее в том, что одновременно с произносимым словом показывают вещь (или действие), им обозначаемое. Каждый младенец проходит школу остенсивных определений (другого способа начать овладевать родным языком просто не существует). Операциональное — такое определение, когда значение слова становится ясным в результате демонстрации и (или) описания действий человека с определяемым предметом или другой вещью, способствующей дефиниции. Прекрасный пример операционального определения прямой дал великий французский математик Анри Пуанкаре (1854—1912). Он предложил использовать для этого тот практический прием, которым чертежники с незапамятных времен проверяют прямолинейность линейки. Состоит он в следующем. По рабочей кромке проводим линию. Переворачиваем линейку через рабочую кромку, совмещая ее с линией. Если они совпадают,двигаем линейку вдоль линии. Если совпадение не нарушается, говорим: "Вот такую линию называют прямой". Наиболее распространены **классификационные** определения. Они представляют собой дефиниции через **содержание** понятия. В логике рассматривают парную к содержанию категорию — **объем понятия**. Определение через объем — единственный способ введения абстракций более высокого уровня, чем первый. Оно состоит в том, что перечисляют элементы того множества, которому присваивается имя. Например: выражение *элемент электрической цепи* — имя множества, которому принадлежат резистор, конденсатор, индуктивная катушка, диод, транзистор, выключатель, лампочка накаливания и т. д.

Важнейшее значение имеет определение, называемое **контекстуальным**. Дело в том, что подавляющее большинство терминов многозначны, т. е. являются именами разных предметов мысли. В словарях и справочниках (кроме толковых словарей обиходного и литературного языка) этот факт обычно не находит отражения. Поэтому, чтобы понять, в каких значениях используют слово, необходимо анализировать смысл текстов, его содержащих. Эту процедуру и называют контекстуальным определением.

По конструкции предложения различают **реальные** и **номинальные** определения. В первых речь идет о предмете мысли из мира вещей или мира идей. Например: "Самолет — летательный аппарат тяжелее воздуха с неподвижным крылом и тепловым двигателем". Во вторых определяют термин, т. е. предмет из мира знаков. Например: "*Самолет* есть термин, которым обозначают летательный аппарат тяжелее воздуха с неподвижным крылом и тепловым двигателем". Как мы уже выяснили, дефиниция — процедура, объясняющая **значение термина**. Поэтому реальные определения следует рассматривать как краткую форму номинальных.

3.6. Тирания формы

Форма содержательна. Содержание сообщения может быть понято адресатом только потому, что оно выражено в определенной общепринятой форме. Иными словами, форма **навязывает** читателю понимание. И если автор по какой-нибудь причине (небрежность, непонимание) использует форму, неадекватную содержанию, вы сможете понять суть дела, только преодолев противоречие между формой и содержанием.

Нередко ложное понимание связано с формой "если..., то...". Она соответствует причинно-следственной связи. Но часто ее используют либо тогда, когда такой связи нет, либо тогда, когда она обратима. Аналогично в математической записи $y = f(x)$ переменную x , расположенную справа от знака равенства, называют аргументом, или **независимой** переменной, а y — функцией, или **зависимой** переменной. Данные термины — внутриматематические, но об этом никто не предупреждает, и вам кажется, будто переменной x отображают причину, а переменной y — следствие. В действительности же часто между x и y отношение не подчинения, а **взаимозависимости**. Например, для закона Ома одинаково верны формулы $i = u/R$ и $u = Ri$. Возможно, чтобы осознать это, полезно было бы увидеть взаимосвязь напряжения и силы тока в форме уравнения: $u - Ri = 0$.

3.7. "Птичий язык"

Вдумаемся в обычное школьное предложение "Сила совершает работу". Сопоставим его с предложениями, часто находящимися в учебниках поблизости: "Падающая вода совершает работу"; "Пар совершает работу"; "Человек совершает работу". Сила и работа в тех же учебниках определены как физи-

ческие величины. Физические величины принадлежат к миру идей, а падающая вода, пар и человек — к миру вещей. Поэтому предложение "Сила совершает работу" лишено какого бы то ни было физического смысла, равно как и предложение "К телу (предмет из мира вещей) приложена сила (предмет из мира идей)".

К сожалению, подобных формулировок очень много. Пытаться понять их буквально — безнадежное занятие. В "Былом и думах" А. И. Герцен использовал для подобных бессмысленных формулировок название "птичий язык", а американский физик-теоретик Дж. Синг рекомендовал факты смешения предметов из мира вещей и мира идей называть "синдромом Пигмалиона".

3.8. Мысленная модель

Эмпирическое исследование отличается тем, что человек взаимодействует (как правило, через посредство приборов) **с самим изучаемым объектом**. При теоретическом исследовании он формирует мысленную модель объекта и изучает ее. Что такое мысленная модель? Это **приближенное знание** об объекте, в котором учтены его свойства, существенные в определенном отношении. В науках, которые принято называть "точными", мысленная модель обычно представлена в математической форме. Например, простейшей мысленной (математической) моделью резистора является закон Ома для участка цепи $U = Ri$, конденсатора — формула $q = Ci$; индуктивной катушки — формула $\psi = Li$.

Нередко можно прочесть, будто мысленные модели вводят "для упрощения". Это неверно. Никак иначе, кроме как в форме мысленной модели, человек ни о чем размышлять не может — в мозгу нет самих изучаемых объектов. Мысленная модель может быть проще или сложнее, но это всегда модель, всегда **приближенное знание**.

По мере развития любой теории мысленные модели ее объектов усложняются — их свойства отображают более многогранно и точно. Однако большей частью наиболее точные представления не используют — в этом нет необходимости. Например, короткий участок кривой линии часто можно заменить отрезком прямой. Эту операцию называют **линейной аппроксимацией**. Термин *аппроксимация* используют и в других случаях как синоним выражения *приближенное представление* (при этом надо помнить, что **всякое**, даже самое сложное представление — приближенное).

Формирование мысленной модели — творческий, не поддающийся алгоритмизации процесс. Однако, как правило, удается успешно пользоваться только теми мысленными моделями, которые были изобретены предшественниками и уже многократно оправдали себя.

3.9. Закон

Со словом *закон* связано много предрассудков. Бесконечное число раз можно прочесть, будто природные явления "подчиняются" законам, природа "соблюдает" законы, законы "управляют" природными процессами, "определяют" или "регулируют" их, "действуют" (или не действуют), "выполняются" (или не выполняются) и т. п. В результате у неискушенного читателя создается впечатление, будто наряду с самой природой существует некий "законодательный орган". Очевидно, признавать его наличие могут лишь религиозные люди. С наукой подобные представления несовместимы. В природе все происходит "само по себе", без чьего-либо вмешательства. Человек познает происходящие явления, обнаруживает **неизбежно повторяющиеся** и создает их **мысленные модели**. Именно эти мысленные конструкции и называют научными законами. Иными словами, без термина *закон* вполне можно было бы обойтись. Однако он настолько прочно вошел в лексикон, что сделать это, по-видимому, невозможно. Но надо правильно понимать его значение.

3.10. Образное мышление и искусственная наглядность

Человек воспринимает окружающий мир только благодаря наличию органов чувств.

Замечание

Идея о наличии сверхчувственного (экстрасенсорного) восприятия — фантазия, не имеющая научного обоснования. Желаясь познакомиться с этой темой подробнее рекомендую прочитать первую статью в "Диалектике природы" Ф. Энгельса — "Естествознание в мире духов", пьесу Л. Толстого "Плоды просвещения" и книги: Китайгородского А. И. "Реникса" и Хэнзела Ч. "Парапсихология".

Принято различать две ступени познания — чувственную и логическую. К первой относятся ощущения, восприятия и представления, ко второй — понятия, суждения и умозаключения. Познание логической ступени формируется на базе образов, выработанных чувственной ступенью. В процессе развития животного мира, в том числе вида "человек разумный" развились те органы восприятия, которые были необходимы в борьбе за существование. В результате человек прекрасно ориентируется в пространстве, и такие **понятия** механики, как 'длина', 'скорость', 'поступательное движение', 'вращательное движение' и т. п. имеют твердую опору в виде **чувственных образов**. Иначе говоря, эти понятия **наглядны**. Иная ситуация с понятиями теории электричества. В процессе развития человек не встречался с необходимостью воспринимать электромагнитные явления. Поэтому не возникли и соответствующие органы чувств. Таким образом, понятия о мире электриче-

ских явлений не наглядны — **непосредственно** представить их себе невозможно. Это надо признать и не огорчаться.

Вместе с тем, необходимо понимать, что потребность в чувственном, образном представлении — неотъемлемое свойство человеческой психики. Ввиду этого при изучении ненаглядных объектов происходит обратный процесс — под влиянием осмысления понятий формируются "искусственные представления" ("искусственная наглядность"). Так, Фарадей изобрел силовые линии электрического и магнитного полей, способствующие пониманию электромагнитных процессов. Возникло представление об электрическом токе, напоминающем движение жидкости в трубе, и эта модель прекрасно работает. Были созданы наглядные мысленные модели атома — пудинговая (лорд Кельвин) и планетарная (Резерфорд). Затем появились диаграммы Фейнмана для описания взаимодействий и превращений элементарных частиц.

Известный советский физик член-корреспондент АН СССР Е. Фейнберг считает, что наглядность — понятие относительное, постепенно изменяющееся. Он пишет: "Степень наглядности и очевидности здесь (при анализе субатомных, процессов. — К. Г.) столь значительна, что до всякого теоретического расчета какого-либо явления специалист обычно уже составляет себе наглядную картину процесса и заранее может сказать в общих чертах, что именно должно получиться, дать его полуколичественную характеристику. Существует даже популярный парадоксальный афоризм, принадлежащий кому-то из крупных современных физиков (возможно, Р. Фейнману): «Никогда не приступайте к вычислениям, пока не знаете результата»" [11, с. 33].

Совершенно аналогично инженер-электронщик, изучая принципиальную схему устройства, "видит", как по линиям, обозначающим провода, текут токи, и как изменяются напряжения в цепи. Изображение на экране осциллографа (большей частью — график зависимости напряжения от времени) он воспринимает чуть ли не как самую объективную реальность и мысленно представляет себе, как изменится этот график при изменениях в схеме.

Осознавая, что все это — "виртуальная реальность", ею надо овладеть, т. к. без нее "инженерное мышление" невозможно, и если не контролировать таким способом результаты вычислений, в том числе выполненных с применением компьютера, можно получить все, что угодно.

§ 4. Усилитель

4.1. Общие сведения

Каждый пользовался проигрывателем грампластинок или хотя бы видел, как его используют другие. Достаточно ясно, что проигрыватель содержит электродвигатель с диском, звукоусилитель, громкоговоритель, провод с вилкой для включения в розетку, сетевой выключатель, регуляторы громкости и тембра.

Допустим, молодой человек, увлекшийся старыми пластинками и не имеющий возможности приобрести проигрыватель, поскольку их перестали производить, надумал сделать его сам. Он приобрел первые пять элементов, решив, что для начала обойдется без регулятора громкости и тембра. К двигателю он присоединил выключатель и провод с вилкой. Обнаружив у звукоснимателя и громкоговорителя по паре электрических выводов, он решил, что их надо соединить между собой так же, как батарейку и лампочку в карманном фонарике (рис. 1.2). Смонтировав все на доске, молодой человек положил на диск пластинку, включил двигатель, опустил на пластинку звукосниматель и услышал... "комариный писк". Очевидно, объясняется это тем, что энергия сигнала, поступающего из звукоснимателя в громкоговоритель, недостаточна.

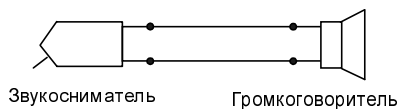


Рис. 1.2

Что же имеется в проигрывателе сверх упомянутых элементов, обеспечивающее громкое звучание? Оказывается, между звукоснимателем и громкоговорителем включено устройство, благодаря которому в громкоговоритель поступает сигнал, энергия которого больше энергии сигнала звукоснимателя (рис. 1.3). Такие устройства мы обнаружим во всех электронных аппаратах. Их называют **усилителями**. Сигнал может поступать на **вход усилителя** с магнитной головки в магнитофоне, антенны — в радиоприемнике, фотоэлемента — в турникете на станции метро и т. п. Общее название для всех них — **источник сигнала**. Пару выводов усилителя, соединенных с источником сигнала, называют **входом усилителя**. Пару выводов, соединенных с громкоговорителем или другим устройством, в котором желают получить некоторый полезный эффект, именуют **выходом усилителя**, а сам этот элемент — **нагрузкой**, или **приемником** (см. рис. 1.3).

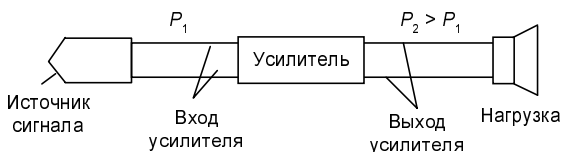


Рис. 1.3

Усилители являются главными элементами всех технических средств управления, связи, познания и проектирования, а также бытовой электроники.

Для получения эффекта усиления используют разные формы движения материи. Известны электронные усилители, магнитные, электромашинные, гидравлические, пневматические и др. Общим для всех них является нали-

чие эффекта усиления. Так как обычно выходной сигнал усилителя по форме подобен входному, можно говорить не об энергии, а о мощности — физической величине, которой мы оцениваем быстроту изменения энергии.

Замечание

Феномен усиления присущ не только техническим средствам информационной сферы. Это — **физическое явление**, состоящее в том, что энергия реакции объекта, обладающего свойством усиления, на воздействие другого объекта, превышает энергию воздействия. Усиление, наряду с изменчивостью, наследственностью и метаболизмом, является атрибутом (неотъемлемым свойством) жизни, т. е. должно входить в определение жизни. Человечество выделилось из остального животного мира благодаря тому, что овладело свойством усиления. В неразвитой форме усиление присуще и неживой природе (например, лавины в горах, оползни, лесные пожары). Подробнее о явлении усиления см. статью: Гомоюнов К. К. Физическое явление, не замеченное авторами программ и учебников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского технического университета, 2001, № 2, с. 64—69.

4.2. Энергетический портрет усилительного каскада

Приведенному словесному описанию соответствует абстрактная схема, показанная на рис. 1.4.

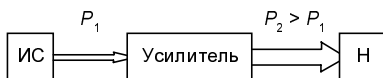


Рис. 1.4

Широкими стрелками на ней изображены "потoki энергии". Каким образом обеспечивается такое функционирование усилителя — ведь оно должно соответствовать закону сохранения энергии? Понять это нетрудно, рассмотрев "энергетический портрет" **усилительного каскада**, или **однокаскадного усилителя** (значение этих терминов выяснится дальше). Он показан на рис. 1.5. Это — предельная абстракция. Она содержит только **необходимые** элементы, то есть те, без которых усиление вообще невозможно: **источник питания** (часто иносказательно называемый источником энергии) и **управляющий элемент**. Источник питания представляет собой неиссякаемый (в пределах данной конкретной системы) резервуар движения (иносказательно — энергии).

Замечание

Термин *энергия* используют в трех значениях: 1) физическая величина (например: "Энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ"); 2) движение (или форма движения) материи (например: "При сгорании топлива химическая энергия превращается в тепловую"); 3) фантом, химера (например: "При расщеплении тяжелого ядра

образуются более легкие ядра, нейтроны или другие элементарные частицы и выделяется энергия"). Вещи по имени "энергия", не существует. При делении ядра осколки (продукты деления) разлетаются с большими скоростями. Энергия их движения равна "освободившейся" ядерной энергии.

Под действием входного сигнала управляющий элемент управляет отбором энергии источника. Свойства управляющего элемента таковы, что энергия сигнала, поступающего в нагрузку, больше энергии сигнала, получаемого от источника сигнала. Эффективность работы усилительного каскада оценивают величиной K_P , именуемой **коэффициентом передачи мощности**:

$$K_P = \frac{P_2}{P_1},$$

где P_1 — мощность управляющего сигнала; P_2 — мощность сигнала, поступающего в нагрузку.

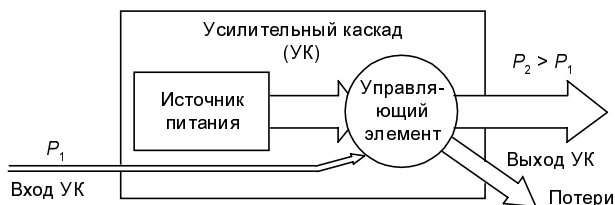


Рис. 1.5

Согласно всему вышесказанному, **усилителями называют устройства, коэффициент передачи мощности которых превышает единицу.**

Замечание

Часто используют выражение "сигнал усиливается". Оно способно вызвать впечатление, будто внутри усилительного каскада энергия сигнала постепенно увеличивается (рис. 1.6). Выражение "сигнал усиливается" нельзя понимать буквально. В действительности в транзисторных цепях процесс протекает так, как описано выше.

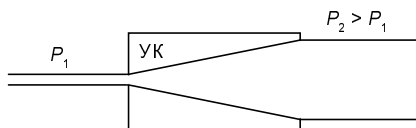


Рис. 1.6

Как правило, одного усилительного каскада оказывается недостаточно, чтобы в нагрузку поступил сигнал требуемой мощности, т. к. коэффициент пе-

редачи мощности K_P всегда ограничен. В таких случаях строят многоступенчатые усилители (рис. 1.7), называемые **многоступенчатыми**. Одну ступень многокаскадного усилителя называют **усилительным каскадом**.

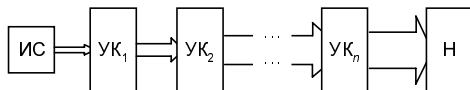


Рис. 1.7

4.3. Простейшая схема однокаскадного усилителя

Постарайтесь сообразить, известно ли вам с детства какое-либо очень простое электрическое устройство, энергетический портрет которого совпадает с показанным на рис. 1.5.

Таким устройством является "батарейный" карманный фонарик, электрическая принципиальная схема которого показана на рис. 1.8.

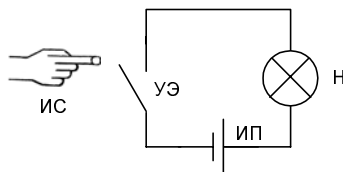


Рис. 1.8

Источником питания (ИП) в нем служит батарейка, управляющим элементом (УЭ) — выключатель. Нагрузка (Н) — лампочка; источник сигнала (ИС) — рука человека (в том, что эффект усиления налицо, легко убедиться, сравнив два вида карманных фонариков — батарейный и динамический: при использовании второго рука довольно быстро устает).

Как это ни парадоксально, аналогичной может быть схема простейшего однокаскадного усилителя для проигрывателя грампластинок (рис. 1.9). Посмотрите внимательно: источник питания, управляющий элемент и нагрузка здесь соединены точно так же, как в схеме на рис. 1.8, а именно последовательно (источник ИП0 и резистор R — вспомогательные элементы, обеспечивающие требуемый режим работы транзистора). Существенные отличия состоят в том, что, во-первых, транзистор управляется не воздействием руки человека, а электрическим сигналом, и, во-вторых, он способен изменять ток нагрузки плавно, а не ступенчато (включено — отключено), как выключатель.

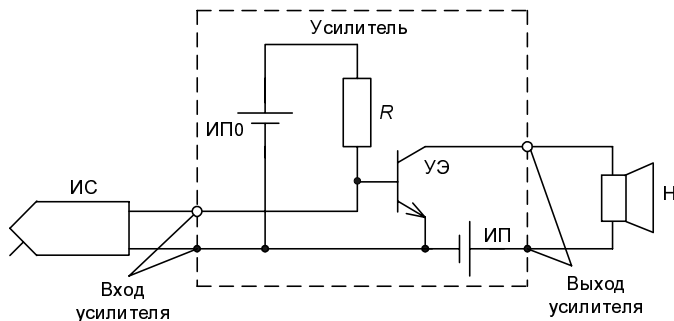


Рис. 1.9

Допустим, коэффициент передачи мощности однокаскадного усилителя оказался малым для достаточно громкого звучания громкоговорителя. Естественно, возникает мысль сделать двухкаскадный усилитель, включив еще один такой же усилительный каскад (рис. 1.10). Нагрузкой первого усилительного каскада в этом случае является вход второго усилительного каскада. Мысль эта вполне здравая, но надо проверить, работоспособно ли придуманное устройство (в инженерной практике нередко оказывается, что, казалось бы, хорошая идея по какой-то причине непригодна). Однако здесь мы вынуждены прервать обсуждение, т. к. не располагаем необходимыми и достаточными для проверки знаниями. Прежде всего, придется усвоить некоторый минимум сведений об электрических цепях и транзисторах.

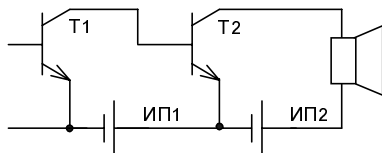


Рис. 1.10

4.4. Электрические цепи

Чтобы установить пригодность только что приведенной схемы, достаточно иметь самые элементарные сведения об электрических цепях. Вот эти сведения (*подробную информацию об электрических цепях см. в главе. 2*). На рис. 1.11, а показано условное графическое обозначение химического источника питания. Длинной черточкой обозначают "положительный" полюс, короткой — "отрицательный" (рис. 1.11, б). При изучении электрических цепей необходимо и достаточно понимать смысл знаков "+" и "-" чисто феноменологически, т. е. не вдаваясь в механизм явления: если источник соединен с резистором (рис. 1.11, в), то электрический ток протекает **вне источника** от положительного полюса к отрицательному (рис. 1.11, г).

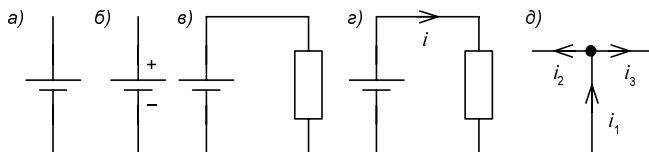


Рис. 1.11

В одноконтурной цепи (рис. 1.11, в) сила тока во всех сечениях одинакова.

В разветвленной цепи (рис. 1.11, д), втекающий в узел ток равен сумме вытекающих: $i_1 = i_2 + i_3$.

Электрическая цепь подобна кровеносной системе. Электрический ток подобен току крови. Кровь циркулирует в **замкнутой системе**. Источником ее движения служит насос — сердце. Оно выталкивает кровь. Пройдя через многочисленные разветвляющиеся и сливающиеся сосуды, кровь **полностью возвращается** обратно. Электрический ток тоже возможен только в **замкнутой цепи** при наличии "насоса" — источника питания. Ток вытекает из "положительного" полюса и **полностью возвращается** в "отрицательный" независимо от числа разветвлений в цепи (например, как на рис. 1.12). Иными словами, ни в одном элементе электрической цепи электрический заряд **не накапливается**. Из этого следует, что меньше двух выводов (полюсов) элемент электрической цепи иметь не может: по одному ток втекает, по другому вытекает.

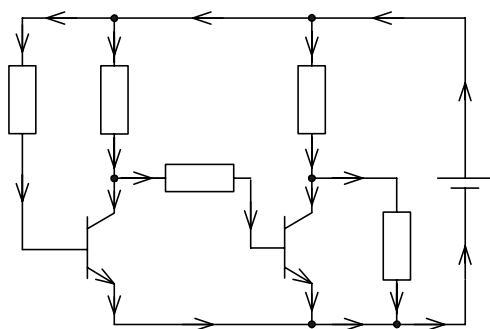


Рис. 1.12

4.5. Биполярный транзистор

В качестве управляющих элементов усилителей любой физической природы можно использовать только такие устройства, которые асимметричны в определенном смысле. А именно, их вход влияет на выход сильнее, чем выход на вход (в образной форме эта мысль выражена на рис. 1.13). **Входом управляю-**

щего элемента называют тот его участок (фрагмент), который воспринимает воздействие (сигнал) источника сигнала, **выходом** — фрагмент, связывающий источник питания с нагрузкой. Простейшие, хорошо известные примеры таких устройств — электрический выключатель и водопроводный кран (в них обратное влияние полностью отсутствует). В выключателе входом служит рычажок или кнопка, на которую человек воздействует рукой, а выходом — пара выводов, один из которых соединен с неподвижным контактом, второй — с подвижным. Контакты подключают нагрузку к источнику питания или отключают ее. Существуют автоматически срабатывающие выключатели, например, электромагнитные реле. У них входом служит пара выводов катушки электромагнита, а выходом — пара выводов от контактов (обычно в реле имеется несколько пар контактов, изолированных друг от друга).

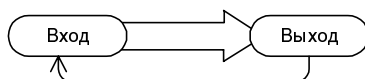


Рис. 1.13

Транзисторы подразделяют на биполярные и полевые. Биполярный транзистор представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру, к каждому слою которой прикреплен металлический вывод (*подробнее о биполярных транзисторах см. § 11*). На рис. 1.14 схематически показан в разрезе транзистор типа n - p - n . Хотя тип проводимости наружных слоев одинаков (в данном случае — n , электронная), размерами и концентрацией носителей (электронов) они различаются. Верхний слой называют **эмиттером**, средний — **базой**, нижний — **коллектором**. Структура транзисторов типа p - n - p аналогична, но типы проводимости слоев противоположны. Поведение транзисторов типа p - n - p отличается только противоположными знаками всех напряжений и токов.

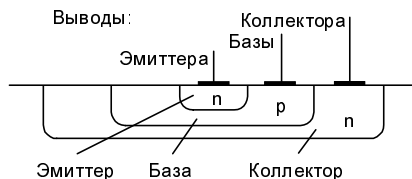


Рис. 1.14

Условные графические обозначения биполярных транзисторов, соответствующие ГОСТ 2.730—73 "Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые", показаны на рис. 1.15 (согласно ГОСТу окружность в обозначении транзистора можно не чертить). Стрелкой обозначен вывод эмиттера (Э). Ориентируясь на него, легко установить другие важные сведения. Напротив вывода эмиттера изображен вывод коллектора

(К), в сторону — вывод базы (Б). Острые стрелки, направленные наружу, указывает, что это — транзистор типа $n-p-n$, направленные внутрь — транзистор типа $p-n-p$. Направление стрелки непосредственно показывает направление тока в эмиттерном выводе, вызванного источником питания или источником сигнала, когда транзистор открыт. Выражения "транзистор закрыт (заперт)" и "транзистор открыт" употребляют в том же смысле, что и утверждения "водопроводный кран закрыт" и "водопроводный кран открыт". "Транзистор открыт" означает, что между его коллектором и эмиттером может протекать электрический ток, если есть источник питания и цепь замкнута.

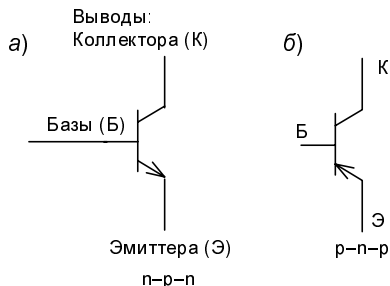


Рис. 1.15

По направлению острия стрелки можно установить также направления токов двух других выводов, воспользовавшись "**правилом муравья**", т. е. предположив, что острие стрелки, не поворачиваясь на 180° , "переползает" на интересующий нас вывод (рис. 1.16).

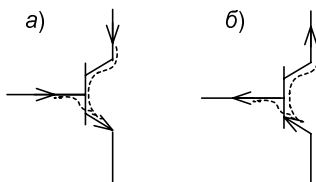


Рис. 1.16

Любое воздействие в электрической цепи, в том числе поступающее от источника сигнала, передается по **двум** проводам, т. к. ток должен и втекать, и вытекать. Поэтому **входом транзистора** должна служить пара выводов. Поскольку у транзистора три вывода — эмиттер (Э), база (Б) и коллектор (К), логически возможны три входных пары: Э—Б, Б—К и К—Э. Любая ли из них фактически может служить входом? Нет. В согласии с процессами, происходящими внутри транзистора, входными могут быть, вообще говоря, только первая и вторая пары. Но и они неравноценны из-за различий эмиттера и коллектора. Пара Э—Б обеспечивает большее усиление, чем пара Б—К. По-

этому обычно ее и используют в качестве входной (как на рис. 1.9). Такое включение транзистора называют "нормальным" (другое — "инверсным", т. е. обращенным). Пара К—Э в качестве входной не обеспечивает эффекта, показанного на рис. 1.13, и, следовательно, входом служить не может.

Ток источника сигнала, подключенного ко входу транзистора, управляет током источника питания, который протекает через выводы коллектора и эмиттера (именно этот ток в схеме на рис. 1.9 протекает и через нагрузку, т. е. является током нагрузки). Следовательно, **выходом транзистора служит пара К—Э**.

Таким образом, через вывод базы протекает только управляющий ток транзистора (пунктирная линия на рис. 1.17), через вывод коллектора — только управляемый ток (штриховая линия на рис. 1.17), а через вывод эмиттера — ток, равный их сумме.

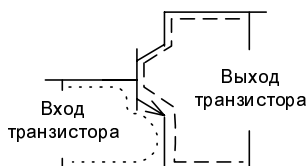


Рис. 1.17

4.6. Базисные схемы усилительных каскадов

Теперь мы можем приступить к оценке пригодности предполагаемого двухкаскадного усилителя (см. рис. 1.10). Руководствуясь "правилом муравья", легко увидеть, что он неработоспособен: ток в контуре связи транзисторов Т1 и Т2 должен протекать в противоположных направлениях (рис. 1.18).

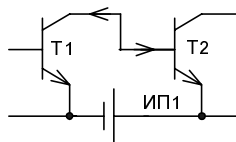


Рис. 1.18

Как же строят многокаскадные усилители? Об одном варианте решения догадаться нетрудно, вспомнив, что направления токов в одноименных выводах разнотипных транзисторов противоположны (см. рис. 1.16). Это позволяет во втором усилительном каскаде применить транзистор типа р-п-р вместо транзистора типа п-р-п (рис. 1.19). Однако очевидно, что должен быть вариант и с однотипными транзисторами: ведь известно, что в ламповую эпоху многокаскадные усилители строили, а лампы существовали только электронные (создать позитронную лампу невозможно).

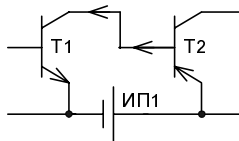


Рис. 1.19

Присмотримся к рис. 1.8. Мы видим в цепи три двухполюсника — источник питания (ИП), управляющий элемент (УЭ) и нагрузку (Н). Они соединены **последовательно**. Подумаем, нельзя ли соединить их как-нибудь иначе.

Нетрудно догадаться, что возможно еще одно, и только одно, соединение — **параллельное** (рис. 1.20, а). Оно выглядит работоспособным: свечение лампочки управляется выключателем — когда его контакты разомкнуты, лампочка горит; когда замкнуты — не горит. Имеется, однако, неприятность, не позволяющая использовать этот вариант. Состоит она в следующем. Когда контакты выключателя соединены (замкнуты), батарейка замыкается, как говорят, "короткозамкнутой". Но она не может даже малое время работать в таком режиме — быстро выходит из строя.

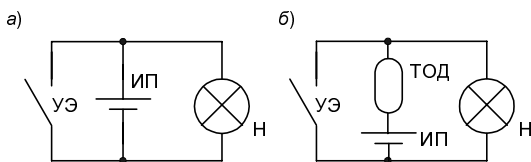


Рис. 1.20

Однако известен способ, позволяющий "спасти" батарейку и, тем самым, параллельную схему: последовательно с батарейкой надо включить токоограничивающий двухполюсник (ТОД) (рис. 1.20, б). Именно параллельная схема и пригодна для связи усилительных каскадов с однотипными транзисторами. На рис. 1.21, а показан простейший вариант такого двухкаскадного усилителя. В качестве токоограничивающего двухполюсника часто используют резистор (R_{TO}) (рис. 1.21, а).

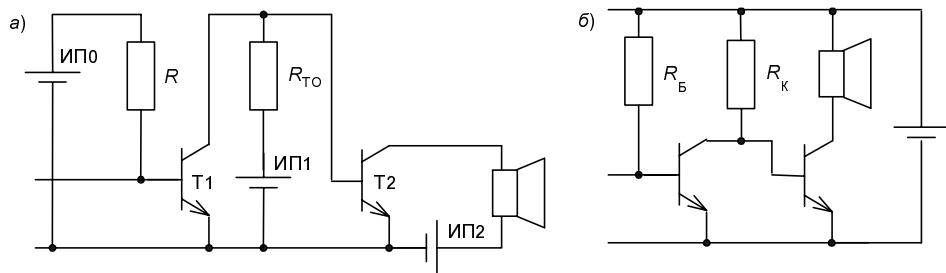


Рис. 1.21

Практически схема оказывается проще. Обратим внимание: отрицательные выводы всех трех источников питания на рис. 1.21, *а* соединены вместе. Поэтому можно использовать один источник, что экономически выгоднее (рис. 1.21, *б*). Резистор, подключенный к базе, часто обозначают через R_B , а резистор, соединенный с коллектором (R_{TO}) — через R_K и называют "коллекторным резистором". Следует, однако, помнить, что его назначение — ограничение тока (в литературе зачастую о назначении резистора R_K либо вообще ничего не пишут, либо пишут неверно).

Обратим внимание на различие характера зависимостей тока нагрузки от тока коллектора в последовательной и параллельной схемах. Чтобы сосредоточить внимание именно на этом факте, введем некоторые структурные обобщения. Присмотримся к рис. 1.9. Ко входу транзистора (промежутку Б—Э) подключен двухполюсник, содержащий источник сигнала и вспомогательные элементы ИП0 и R . Назовем его **входным двухполюсником (ВД)** транзистора. Вход транзистора Т2 в рассматриваемых схемах служит нагрузкой усилительного каскада с транзистором Т1. Обозначим его буквой Н. Тогда последовательная и параллельная схемы, будучи изображены с этими обобщениями, примут вид, показанный соответственно на рис. 1.22, *а* и 1.22, *б*. Теперь мы отчетливо видим связь тока нагрузки i_H и выходного (коллекторного) тока i_K транзистора.

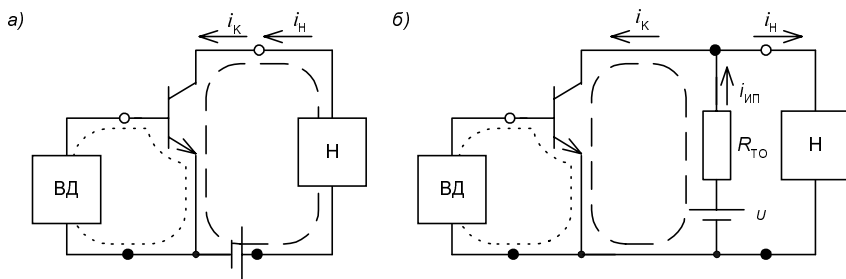


Рис. 1.22

В последовательной схеме она прямая:

$$i_H = i_K,$$

а в параллельной схеме — обратная:

$$i_K = i_{ип} - i_H,$$

где $i_{ип}$ — ток источника питания.

Иными словами, в последовательной схеме направление выходного тока (тока нагрузки) совпадает с направлением коллекторного тока транзистора, а в параллельной — противоположно ему.

Итак, существуют две, и только две базисные схемы усилительных каскадов — последовательная и параллельная. В первой источник питания, выход (промежуток К—Э) транзистора и нагрузка соединены последовательно, во второй — параллельно. В последовательной схеме зависимость тока нагрузки от выходного тока транзистора прямая, а в параллельной — обратная. Более сложные схемы представляют собой их модификации или комбинации.

Замечание

Энергетически параллельная схема менее выгодна, чем последовательная. Карманных фонариков со схемой, показанной на рис. 1.20, б, никто не делает. В этом нет необходимости, поскольку выключатель и лампочка нечувствительны к полярности напряжения и направлению тока. Транзисторы же чувствительны, и без параллельной схемы во многих случаях обойтись невозможно.

§ 5. Межкаскадные связи

Межкаскадные связи — важнейший раздел теории транзисторных цепей, т. к. электронное устройство есть продукт объединения в систему усилительных каскадов. Обычно межкаскадные связи включают в себя вспомогательные элементы, как правило, необходимые для обеспечения требуемых режимов работы транзисторов. Но главное в них — правильная передача сигнала с выхода данного усилительного каскада, передающего, на вход следующего, приемного, являющегося для него нагрузкой. Поэтому при первом рассмотрении от вспомогательных элементов (кроме токоограничивающего двухполюсника) можно отвлечься.

Для чего необходимо умение строить межкаскадные связи? Ведь не каждый инженер занимается разработкой новых транзисторных цепей. Дело прежде всего в том, что действительное (истинное) понимание изучаемого материала в любой науке достигается тогда, когда человек способен сам мысленно "построить" изучаемый объект. Выработка опыта такой мыследеятельности важна не только для конкретной науки, но и как образец подхода к изучению любых объектов.

Чтобы научиться строить межкаскадные связи, кроме понятий, введенных в предшествующих параграфах, потребуются еще некоторые понятия и уточнения, чем мы сейчас и займемся.

5.1. Общий вывод транзистора

В теории транзисторных цепей широко используют понятие общего вывода транзистора. Общим может быть любой его вывод. Поэтому различают три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) и общей базой (ОБ) (на всех предыдущих рисунках было показано включение ОЭ).

Замечание

В устаревшей литературе общий вывод называли "заземленным". Это по существу неверно, т. к. общий вывод далеко не всегда соединен с "землей" — заземляющим контуром. **Заземление** — соединение электрических машин, аппаратов, приборов с землей для защиты людей и оборудования от возможного действия электрического тока и обеспечения правильной работы электроустановок. Заземлители — вертикально погружаемые в землю стальные трубы или стержни, или закапываемые стальные листы. Для обеспечения надежного заземления используют много заземлителей, соединенных между собой посредством электросварки толстой проволокой или лентой.

Для чего необходимо понятие общего вывода? Дело в том, что при изучении схемы имеющегося устройства, опознав общий вывод, легко судить о значениях таких параметров усилительного каскада, как коэффициенты передачи тока K_I , напряжения K_U и других. При проектировании транзисторного устройства, зная, каким должны быть значения коэффициентов передачи и других параметров, легко выбрать подходящий тип усилительного каскада.

Почему вообще возникла проблема общего вывода? Ведь при использовании традиционных управляющих элементов — выключателя, электромагнитного реле или современных оптронов — ее нет.

В карманном фонарике выходной контур (контакты выключателя, батарейка и лампочка) электрически изолирован от входа: вход (механическое воздействие) вообще имеет иную, неэлектрическую природу. У электромагнитного реле или оптрона вход электрический, но электрической связи между входом и выходом нет, т. к. на пути от входа к выходу форма движения материи преобразуется: у электромагнитного реле промежуточная форма движения механическая, у оптрона — оптическая (свет). Поэтому здесь нет проблемы электрического соединения входа с выходом.

Замечание

Оптоном называют полупроводниковый оптоэлектронный прибор, состоящий из излучателя света (светодиода) и фотоприемника (фотодиода или фототранзистора), находящихся в одном корпусе. Наиболее распространены оптроны, у которых входной и выходной сигналы электрические, а связь между входом и выходом оптическая (их называют оптопарами). Вход и выход в них электрически совершенно не связаны.

Но когда в качестве управляющего элемента используют транзистор, вход неизбежно электрически соединен с выходом, поскольку в транзисторе форма движения материи не преобразуется.

Вспомним, что входом может служить только **пара** выводов (не один), т. к. ток течет лишь в замкнутой цепи. Аналогично выходом может служить тоже только пара выводов. У биполярного транзистора выходом всегда является

пара коллектор-эмиттер (К—Э). Входом при нормальном включении служит пара база-эмиттер (Б—Э). Как видим, вывод эмиттера принадлежит и входу, и выходу транзистора, т. е. оказывается общим для них. Этот факт и является причиной введения понятия 'общий вывод'. Его вводят, рассматривая не сам по себе транзистор, а его связь с источником сигнала и нагрузкой. Дело в том, что транзистор интересен только потому, что он является управляющим элементом усилительного каскада. А усилительный каскад связывает между собой нагрузку и источник сигнала.

Присмотревшись к рис. 1.22, мы увидим, что в последовательной схеме (рис. 1.22, а) эмиттер соединен с входным двухполюсником непосредственно, а с нагрузкой — через источник питания. В параллельной же схеме и с входным двухполюсником, и с нагрузкой эмиттер соединен непосредственно. Оба эти типа связи называют включением **с общим эмиттером** (ОЭ). Аналогично существуют последовательная и параллельная схемы, где транзистор включен **с общим коллектором** (ОК) и **с общей базой** (ОБ). Две первые показаны на рис. 1.23, две вторые — на рис. 1.24. На рис. 1.23, а коллектор транзистора соединен и с входным двухполюсником (ВД), и с нагрузкой (Н) через источник питания. На рис. 1.23, б коллектор соединен с входным двухполюсником через источник питания, а с нагрузкой непосредственно. Соединения базы с входным двухполюсником и нагрузкой на рис. 1.24 аналогичны соединению с ними эмиттера на рис. 1.22.

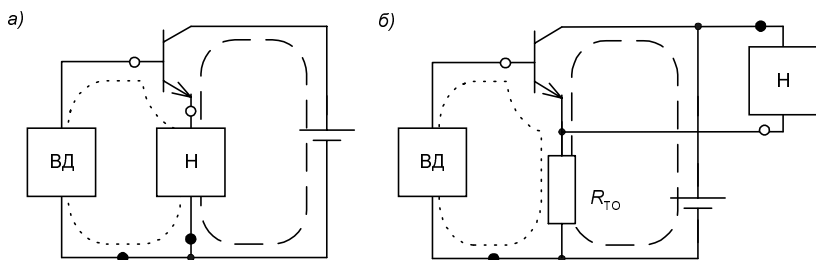


Рис. 1.23

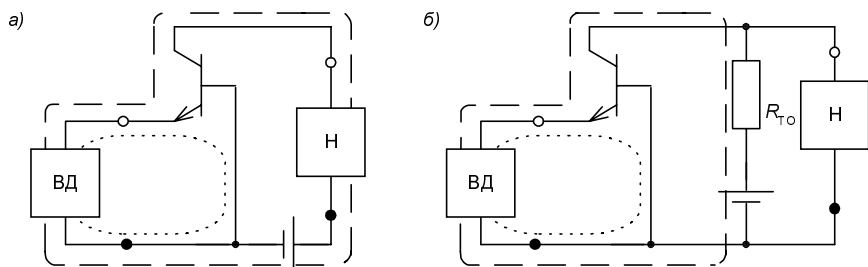


Рис. 1.24

Структура всех шести соединений показана в табл. 1.1.

Таблица 1.1

	Последовательная	Параллельная
ОЭ		
ОК		
ОБ		

Таким образом, **общим называют вывод транзистора, соединенный непосредственно или через источник питания как с одним из выводов входного двухполюсника, так и с одним из выводов нагрузки.** Идентифицировать (опознать) общий вывод, как правило, очень просто: за редчайшим исключением он непосредственно соединен с одним из выводов (полюсов) источника питания. С исключениями мы встречаемся в некоторых случаях применения трансформаторов при передаче сигнала от его источника к входу транзистора. Один из примеров такой схемы приведен на рис. 1.25. Здесь с источником питания соединен коллектор, но включение это с ОЭ, т. к. и с входным двухполюсником, и с нагрузкой соединен эмиттер транзистора.

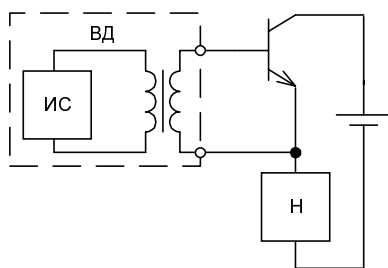


Рис. 1.25

Обратим внимание на особенности трех схем включения, обуславливающие их специфику. При включении с ОЭ (см. рис. 1.22) ток источника сигнала (пунктирная линия) и ток источника питания (штриховая линия) протекают каждый по своему контуру. При включении с ОК (см. рис. 1.23) ток источника сигнала и ток источника питания протекают совместно через нагрузку (в последовательной схеме) или через токоограничивающий резистор (в параллельной схеме). При включении с ОБ (см. рис. 1.24) ток источника питания протекает через входной двухполюсник и, следовательно, через источник сигнала.

Встречаются схемы, в которых один из выводов транзистора соединен с выводами входного двухполюсника и нагрузки не непосредственно (или через источник питания), а через двухполюсник, не являющийся источником питания. Такой вывод общий не называют. Так как эта ситуация — не редкость, целесообразно присвоить ей определенное имя. Более всего подойдет термин *псевдообщий*. Таким образом, наряду с включениями с ОЭ, ОК и ОБ возможны включения с ПЭ, ПК и ПБ. На рис. 1.26 представлено включение с ПЭ для последовательной схемы. Буквой Д на нем обозначен упомянутый двухполюсник, из-за которого эмиттер перестает быть "общим".

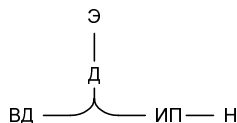


Рис. 1.26

Наконец, существуют усилительные каскады, к которым подключены две нагрузки. В этом случае ни один из выводов ни общий, ни псевдообщим назвать нельзя. На рис. 1.27, а показана одна из таких схем. Для сравнения на рис. 1.27, б и 1.27, в изображены схемы параллельного типа ПЭ и ПК соответственно.

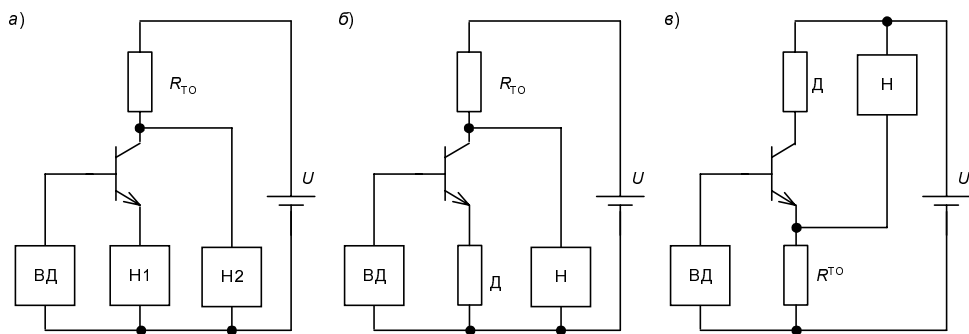


Рис. 1.27

Замечание

Строго говоря, утверждение, что в усилительном каскаде с ОК (см. рис. 1.23) через нагрузку или токоограничивающий резистор протекает два тока, неточное. Никакими физическими средствами их разделить невозможно. Фактически протекает один ток i_{Σ} , равный сумме $i_B + i_K$. Точно так же в схемах на рис. 1.24 через входной двухполюсник течет один ток. В графической форме эти утверждения представлены на рис. 1.28.

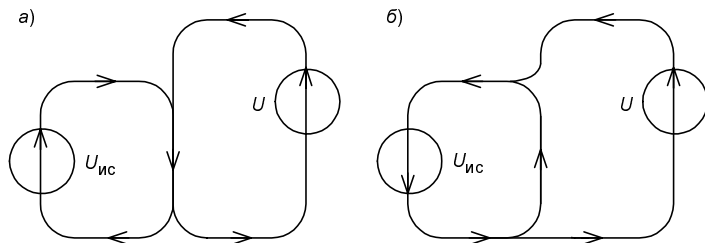


Рис. 1.28

Тем не менее представление тока эмиттера в виде суперпозиции (наложения) токов базы и коллектора (как показано на рис. 1.23 и рис. 1.24) в некоторых случаях полезно с вычислительной точки зрения (помогает решать задачи).

5.2. Выходы усилительных каскадов

Выходы усилительных каскадов обозначены парами кружочков на рис. 1.22, 1.23 и 1.24. Черный кружочек во всех случаях соединен с одним из полюсов источника питания. Белый — с коллектором или эмиттером транзистора. Выводы обозначены по-разному по следующим соображениям. Оба полюса источника питания являются **точками постоянного потенциала**. Это значит, что между ними отсутствует переменное электрическое поле ("представителем" которого служит напряжение), и поэтому присоединение любого из них к металлическому корпусу измерительного прибора или к "земле" не повлияет на работу электронного устройства. При экспериментальном наблюдении процессов в электронной цепи корпус осциллографа или другого измерительного прибора присоединяют к одной из точек постоянного потенциала (*подробнее см. Приложение 2*). Второй выходной вывод усилительного каскада, соединенный с коллектором или эмиттером транзистора и обозначенный белым кружочком, — **точка переменного потенциала**. Ее нельзя соединять ни с точками постоянного потенциала других усилительных каскадов, ни с "землей", ни с корпусами измерительных приборов.

5.3. Входы усилительного каскада и транзистора

Между источником сигнала и входом усилительного каскада (УК) могут быть включены вспомогательные элементы, обеспечивающие требуемый режим работы транзистора (ранее мы их объединили с источником сигнала в понятие 'входной двухполюсник' (ВД)). Один из вспомогательных элементов был показан на рис. 1.9. Еще три варианта включения вспомогательных элементов представлены на рис. 1.29, *а—в*. Для сравнения на рис. 1.29, *г* изображен вход УК с ОЭ без вспомогательных элементов. Очевидно, что он совпадает со входом транзистора.

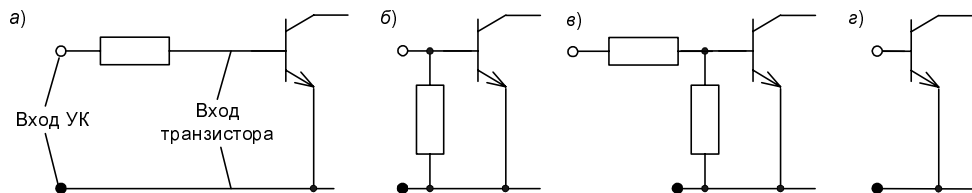


Рис. 1.29

Сущность управления транзистором состоит в том, что ток источника сигнала протекает через его вход, т. е. между выводами базы и эмиттера. Вспомогательные элементы эту сущность не изменяют. Из-за них входной ток транзистора может лишь несколько уменьшиться. Поэтому для понимания принципа построения межкаскадных связей допустимо считать, что вспомогательные элементы отсутствуют. Тогда при включениях с ОЭ (см. рис. 1.22) и ОБ (см. рис. 1.24) вход УК совпадает со входом транзистора. Однако при включении с ОК (см. рис. 1.23) это не так: вход УК содержит не только промежуток Б—Э транзистора, но и двухполюсник, являющийся либо нагрузкой (в последовательной схеме), либо токоограничивающим резистором (в параллельной схеме).

Так же, как и в случае выходов УК, один из пары входных выводов является точкой постоянного потенциала, а второй — точкой переменного потенциала.

Отметим, что у последовательной и параллельной схем каждого типа входы одинаковы (см. рис. 1.22, 1.23 и 1.24).

5.4. Замечание об использовании терминов **вход** и **выход** (транзистора, усилительного каскада, усилителя).

Как указывалось ранее, входом и выходом всегда служат **пары выводов**.

Однако обычно все напряжения отсчитывают по отношению к определенной точке постоянного потенциала — одному проводу, соединенному с каким-то выводом (полюсом) источника питания. Общие выводы транзисторов присоединены к нему же или к другой точке постоянного потенциала. Таким образом, один из полюсов пары "вход" или "выход" всегда подразумевается. Поэтому обычно входом или выходом называют только один вывод, а именно точку переменного потенциала. Например, говорят, что входом транзистора, включенного с общим эмиттером, служит вывод базы, а выходом — вывод коллектора.

5.5. Правила построения межкаскадных связей

Форма представления информации может либо способствовать, либо препятствовать усвоению содержания. Очевидно, желательно первое. Для овладения процедурой построения межкаскадных связей целесообразно руководствоваться следующими правилами:

- Разумно ориентировать условные графические обозначения элементов на рисунках — так, как показано на рис. 1.30.

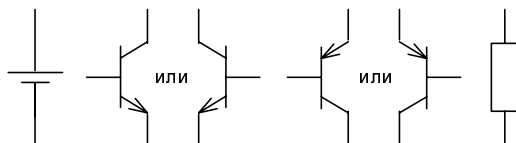


Рис. 1.30

- Желательно любые пары выводов располагать так, чтобы полюс, имеющий более высокий потенциал по отношению к другому, находился на рисунке выше. Например, вход транзистора, включенного с ОБ, целесообразно чертить иначе, чем на рис. 1.24, а именно так, как показано на рис. 1.31.

Замечание

Из только что сказанного не следует, что рис. 1.24 надо переделать. Дело в том, что при изучении материала различного содержания оптимальная форма может быть разной. В частности, описание схемы на рис. 1.24 в случае изменения его в соответствии с рис. 1.31 окажется менее ясным.

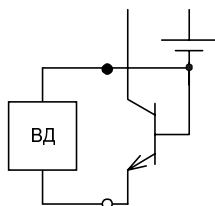


Рис. 1.31

- Принцип действия параллельной схемы УК проще всего понять при расположении ее элементов на чертеже, показанном на рис. 1.22, б. Однако, как правило, от одного источника питается несколько (иногда очень много) усилительных каскадов. Поэтому желательно чертить его условное графическое обозначение вне пределов данного УК. Например, схему на рис. 1.22, б целесообразно изображать, как показано на рис. 1.32.

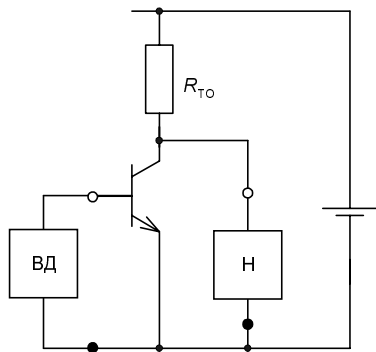


Рис. 1.32

Чтобы показать, что к источнику питания могут быть подключены и другие усилительные каскады, часто продолжают линии проводов питания за пределы данного УК (например, верхняя горизонтальная линия на рис. 1.32).

- Транзистор типа р-п-р и схемы с ним отличаются от транзистора п-р-п и соответствующих схем только тем, что знаки всех напряжений и токов противоположны. Поэтому при соблюдении правил, указанных в пунктах 1 и 2, схемы с транзисторами р-п-р представляют собой "зеркальное отражение" (относительно горизонтальной линии) схем с транзисторами п-р-п. Например, параллельная схема УК с ОЭ (см. рис. 1.32) с транзистором р-п-р выглядит, как показано на рис. 1.33.

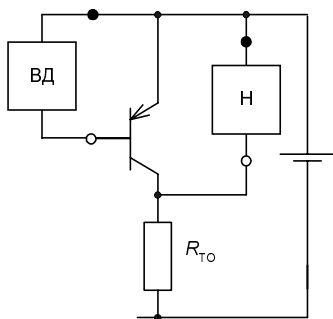


Рис. 1.33

Собственно процедура построения межкаскадных связей состоит в следующем:

1. Задаемся типом связи. Например, в следующей форме: $ОЭ_n \rightarrow ПЭ_p$. Такая запись означает, что сигнал с выхода каскада с ОЭ на транзисторе типа п-р-п передается на вход каскада с ПЭ и транзистором типа р-п-р.

2. Чертим выходы двух схем — последовательной и параллельной — УК, передающего сигнал, выделяя кружочками пары выходных выводов (черными — точки постоянного потенциала, светлыми — точки переменного потенциала).
3. Используя "правило муравья", обозначаем направление выходного тока вблизи от точек переменного потенциала.
4. Правее схем УК, передающего сигнал, чертим вход приемного УК, выделяя черным и светлым кружочками пару его входных выводов.
5. Пользуясь "правилом муравья", отмечаем направление входного тока вблизи от точки переменного потенциала.
6. Из двух схем передающего УК выбираем ту, направление выходного тока которой совпадает с направлением входного тока приемного УК.
7. Чертим схему межкаскадной связи, соединяя друг с другом попарно точки постоянного и переменного потенциала.
8. Проверяем результат, ориентируясь на направления тока источника питания и направления токов транзисторов.

5.6. Два примера

1. $ОЭ_n \rightarrow ОЭ_n$.

- 1.1. Вспоминаем схемы УК с ОЭ с транзистором п-р-п (см. рис. 1.22) и чертим выходы двух схем — последовательной и параллельной; обозначаем стрелками направления выходного тока (рис. 1.34, а, б).

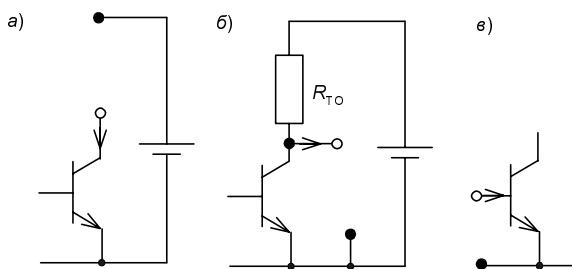


Рис. 1.34

- 1.2. Чертим схему входа приемного УК, отмечая стрелкой направление входного тока (рис. 1.34, в).
- 1.3. Сопоставляя направления входного и выходного токов, видим, что пригодна параллельная схема (рис. 1.35, а).

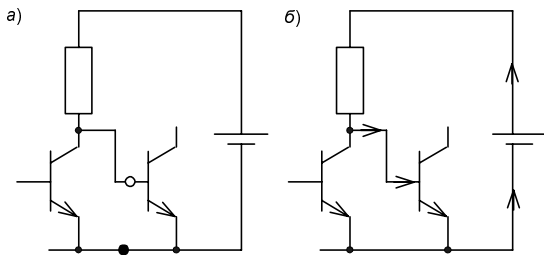


Рис. 1.35

1.4. Проверяем правильность построения, начертив стрелки, показывающие направление тока источника питания (рис. 1.35, б). Убеждаемся в непротиворечивости результата.

2. $ОК_p \rightarrow ОБ_n$.

2.1. В соответствии с рис. 1.23 чертим в виде "зеркального изображения" выходы последовательной и параллельной схем УК с ОК с транзистором р-п-р и обозначаем направления выходного тока (рис. 1.36, а, б).

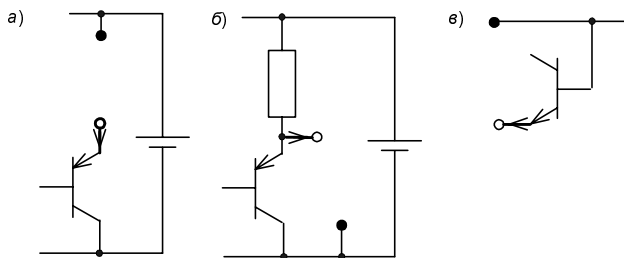


Рис. 1.36

2.2. Согласно схемам на рис. 1.24 чертим вход УК с ОБ с транзистором п-р-п и обозначаем направление входного тока (рис. 1.36, в).

2.3. По направлениям стрелок видим, что подходит последовательная схема (рис. 1.37, а).

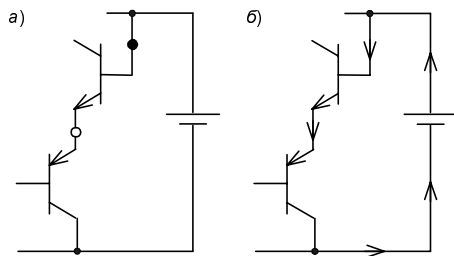


Рис. 1.37

2.4. Проверяем направления токов (рис. 1.37, б).

§ 6. Образное представление о характеристиках

Пониманию сущности любого предмета мысли способствует уяснение его происхождения или способа получения. Осознаем с этих позиций на примере вольт-амперной характеристики (ВАХ), характеризующей тот или иной объект, смысл взаимосвязи между величинами. Это необходимо потому, что характеристика часто воспринимается как атрибут (неотъемлемое свойство) вещи, в то время как в действительности она — наш (человеческий) способ описания поведения вещи в определенной системе при специфических условиях. Например, петля гистерезиса ферромагнитного магнитопровода, пригодная для описания его при непрерывном перемагничивании, неприменима при его перемагничивании импульсами.

Кроме того, приведенные ниже соображения позволят подключить к осмыслению образное мышление, благодаря чему знания становятся более глубокими и прочными.

6.1. Традиционный метод снятия ВАХ

Вспомним, как в школьной лаборатории физики снимают вольт-амперную характеристику двухполюсника (то есть элемента с двумя выводами, например, диода). Простейшая схема, пригодная для этого, показана на рис. 1.38, где Д — изучаемый двухполюсник. Благодаря применению потенциометра П напряжение электрического поля, воздействующего на двухполюсник, измеряемое вольтметром V, можно плавно изменять в пределах от $-U$ до $+U$. Силу тока показывает амперметр А. Вольтметр и амперметр должны быть приборами, чувствительными соответственно к полярности напряжения и направлению тока и иметь нулевую отметку посередине шкалы. Их выбирают такими, чтобы вносить поправки в показания не требовалось.

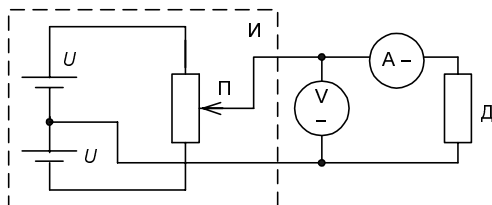


Рис. 1.38

Процедура измерений состоит в следующем. Для некоторого положения движка потенциометра записываем показания приборов в заранее заготовленную таблицу. Изменяем положение движка и записываем новую пару

чисел и т. д. Затем, начертив на миллиметровке оси и выбрав подходящие масштабы, наносим точки, используя в качестве координат пары чисел из таблицы. Соединив точки плавной кривой, получаем искомую ВАХ. Если двухполюсник — резистор, очевидно, получится зависимость, показанная на рис. 1.39.

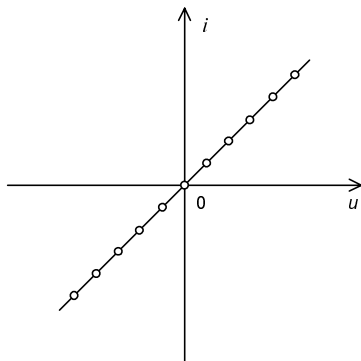


Рис. 1.39

Описанная процедура снятия ВАХ в какой-то мере маскирует непрерывность связи напряжения и силы тока: в процессе измерений мы получаем отдельные (дискретные) точки и лишь потом соединяем их линией, причем это действие выглядит как чисто чертежная процедура.

6.2. Наблюдение ВАХ на экране осциллографа

Существуют, однако, другие способы снятия ВАХ, при которых непрерывность явно прослеживается. Например, характеристику можно увидеть на экране осциллографа. Предельно упрощенная схема используемой для этого измерительной установки показана на рис. 1.40. Здесь И — источник переменного электрического поля, Д — изучаемый двухполюсник, ЭЛТ — электроннолучевая трубка и R — резистор. Резистор необходим по следующим соображениям. Отклонение луча в вертикальном направлении должно быть пропорционально силе тока i_d изучаемого двухполюсника. ЭЛТ "чувствительна к напряжению", а напряжение между выводами резистора пропорционально протекающему току, в данном случае току i_d .

В качестве источника И переменного поля возьмем тот же двухполюсник, что и в предыдущем случае (на рис. 1.38 он обведен прерывистой линией). Установим движок потенциометра посередине. Тогда светящееся пятно окажется в середине экрана ЭЛТ. Перемещая движок вверх, мы увидим, что

оно движется вправо-вверх, а перемещая вниз — влево-вниз. Таким образом, оказывается, что в любой момент времени светящееся пятно "изображает" состояние изучаемого двухполюсника — показывает значение силы тока в его выводах (пропорциональное ординате) и значение напряжения (пропорциональное абсциссе). Для обозначения этого факта разумно ввести термин **изображающая точка**.

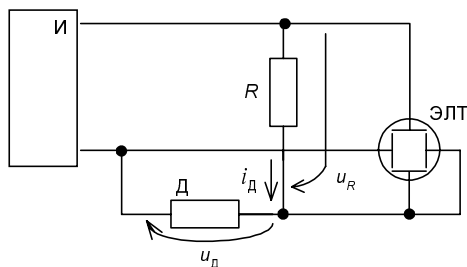


Рис. 1.40

Если экран ЭЛТ покрыт люминофором с длительным послесвечением, быстро переместив движок потенциометра вверх и вниз, мы увидим не только светящуюся точку, но и след ее движения — светящуюся линию. Тем самым мы можем рассматривать вольт-амперную характеристику как траекторию движения изображающей точки (подобно следу микрочастицы в камере Вильсона). Это умозаключение целесообразно распространить на графики любых зависимостей.

Замечание

Обратите внимание на формулировку в начале параграфа: "... напряжение электрического поля, действующего на двухполюсник, можно плавно изменять". Она достаточно точно выражает суть дела. Обычно же пишут: "... напряжение, действующее на двухполюсник". Это — "птичий язык": напряжение — физическая величина, а не объективная реальность и, следовательно, воздействовать на двухполюсник оно не может.

Замечание

Тот факт, что на рис. 1.39 или на экране осциллографа по оси абсцисс "откладывается" напряжение, не следует рассматривать как указание на причинно-следственные отношения такого рода: напряжение будто служит физической величиной, которой отображают причину, а сила тока — величиной, отображающей следствие. Поменяв местами (см. рис. 1.40) двухполюсник D и резистор R (рис. 1.41), мы получим на экране зависимость, где по оси абсцисс "отложена" сила тока двухполюсника D , а по оси ординат — напряжение между его выводами.

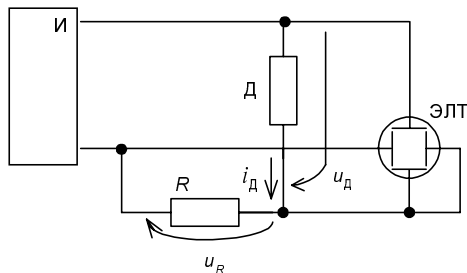


Рис. 1.41

6.3. Статический и динамический режим

Заменим источник электромагнитного поля (И на рис. 1.40), управляемый вручную, электронным устройством (генератором), самостоятельно формирующим периодический сигнал, напряжение которого по форме близко к гармоническому. Частоту сигнала можно изменять в широких пределах, начиная примерно от 0,1 Гц.

Для сигнала, соответствующего нижней границе частоты, мы увидим на экране ЭЛТ то же, что при ручном управлении: светящаяся точка движется, вычерчивая прямую линию. При частоте более 25 Гц движение светового пятна перестанет восприниматься — мы увидим сплошную светящуюся линию.

Повышая частоту дальше, вначале мы не заметим никаких изменений. Однако при какой-то частоте окажется, что линия на экране начнет расширяться, а при дальнейшем ее увеличении расщепится в эллипс (рис. 1.42), ширина которого тем больше, чем выше частота. Обусловлено это тем, что начинает влиять изменение электрического и магнитного полей, окружающих резистор. Чем выше частота, тем сильнее оно сказывается.

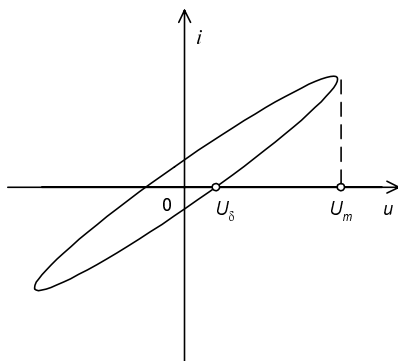


Рис. 1.42

Очевидно, что при этом математическая модель резистора в форме закона Ома окажется неточной. Погрешность можно количественно оценить, введя безразмерную величину δ , равную отношению полуширины U_δ эллипса к амплитуде U_m напряжения (см. рис. 1.42):

$$\delta = \frac{U_\delta}{U_m}.$$

При решении каждой конкретной задачи можно установить, какое предельное значение $\delta = \delta_{\text{ПРЕД}}$ допустимо.

Режим работы при почти нулевой частоте, когда влиянием изменения электромагнитного поля можно безоговорочно пренебречь, называют **статическим**, или **режимом постоянного тока**.

Режим, когда изменение поля сказывается, но в определенных границах его влияние допустимо игнорировать, можно назвать **квазистатическим**. Наконец, режим, при котором названные изменения необходимо учитывать, именуют **динамическим**. Динамическими же называют системы, которым свойствен динамический режим работы. **Динамические системы** (подробнее см. Приложение 1) состоят из элементов четырех типов — **источников**, **диссипаторов**, **динамических накопителей** и **статических накопителей**.

Различие статического и динамического режима работы обусловлено поведением накопителей. При очень медленных изменениях напряжений и токов энергия накопителей существенной роли не играет, и их можно не учитывать.

В электрических цепях источниками служат электромашинные генераторы, электрохимические (гальванические) элементы (неверно называемые "батареями"), солнечные фотоэлементы (фотогенераторы) и др. В них материальное движение какой-либо формы преобразуется в электромагнитное. В диссипаторах происходит обратное преобразование. К их числу принадлежат резисторы, диоды, транзисторы, громкоговорители и т. п. Динамическим накопителем может быть любой проводник, по которому протекает электрический ток, а также специально изготовленный элемент — **индуктивная катушка**. Статическим накопителем — пара проводников с электрическим полем между ними, в том числе **конденсатор**.

Состояние динамической системы в любой момент времени определяется энергией накопителей. С энергией индуктивного накопителя однозначно связана сила тока в нем, а емкостного — напряжение между его выводами. Поэтому данные величины называют **переменными состояниями**.

§ 7. Упражнения и задачи

Овладеть теорией возможно только при условии активной самостоятельной работы с новыми понятиями. Просто чтение учебного материала, даже многократное, приводит лишь к заучиванию (см. рис. 1.1 и комментарий к нему).

Легче всего усваиваются навыки оперирования понятиями и, следовательно, сами понятия в режиме диалога с преподавателем. В случае хорошо составленной обучающей программы к неплохому результату приводят также занятия с использованием компьютера в интерактивном режиме.

Однако возможна и самостоятельная успешная работа.

Очень важно научиться задавать вопросы самому себе (всякая творческая научная или проектная работа развивается путем "внутреннего диалога" — человек формулирует вопросы и ищет ответы на них). Весьма эффективны занятия вдвоем-втроем — при этом обеспечиваются взаимоконтроль и взаимопомощь.

Далее. Теория нужна, в конечном счете, для практики. Поэтому надо учиться задавать себе вопросы не только в теоретическом, умственном плане (например: "Чему равна сила тока в таком-то проводе?"), но и в эмпирическом, предметном (например: "Что покажет амперметр, включенный там-то?"; "Что увидим на экране осциллографа, включенного так-то, при таких-то условиях?").

Начинать следует с усвоения простейших элементов теории, а именно учиться:

- ☐ показывать стрелками на изображениях проводов направление тока в компонентах цепи (например, как на рис. 1.12);
- ☐ идентифицировать (опознавать) вид включения транзистора: с ОЭ, ОБ, ОК, ПЭ, ПБ, ПК а также Х, не принадлежащий ни к одному из этих видов (например, как на рис. 1.43);
- ☐ находить на схеме источник сигнала, усилительный каскад, нагрузку;
- ☐ находить вход и выход усилительного каскада, транзистора;
- ☐ относить схему усилительного каскада к одной из двух базисных: последовательной или параллельной;
- ☐ строить упрощенные (без вспомогательных элементов) межкаскадные связи;
- ☐ представлять, как движется изображающая точка, следом которой является вольт-амперная характеристика.

Начиная изучать элементы теории электрических цепей, чрезвычайно важно освоить правила знаков напряжения и тока, их производных и интегралов по времени, а в дальнейшем постоянно контролировать себя в этом отношении: очень многие ошибки связаны со знаками.

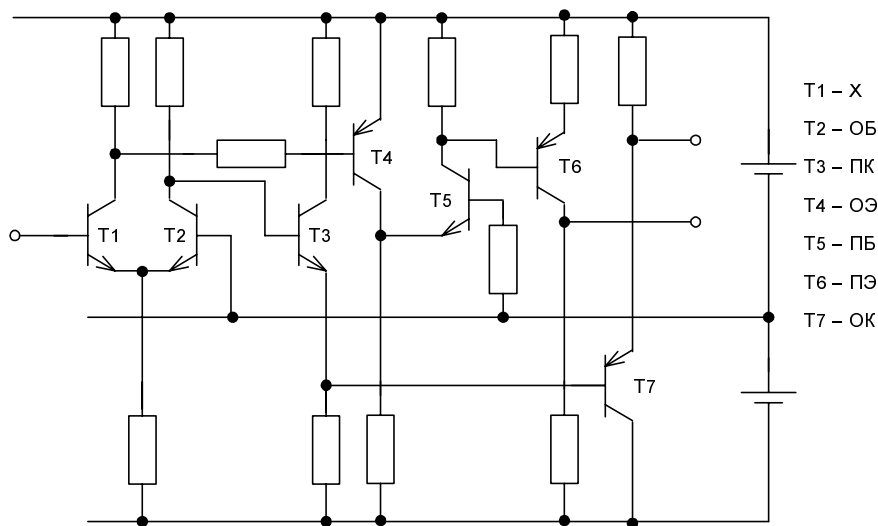


Рис. 1.43

Замечание

Обращение здесь и далее к материалу главы 2 имеет целью заранее сосредоточить ваше внимание на, казалось бы, очень простых, но, тем не менее, очень важных моментах.

Овладевая правилами знаков, необходимо научиться заменять на схемах стрелками, обозначающими направления отсчета, изображения чувствительных к полярности измерительных приборов, и наоборот.

Составлять уравнения Кирхгофа целесообразно вначале для произвольных сечений и произвольных контуров (например, как на рис. 1.44).

Любой человек, в том числе инженер, часто решает задачи неосознанно, интуитивно. Надо понимать, что для инженера этого недостаточно — он должен уметь защитить свою точку зрения, убедить окружающих в своей правоте. Это можно сделать, только опираясь на законы. К данной мысли надо привыкнуть с самого начала. Поэтому законы необходимо научиться не просто писать, но и применять. Начинать следует с самых простых ситуаций. Вот одна из таких (рис. 1.45, а). Что покажет амперметр, включенный в разрыв провода в том месте, где начерчена стрелка, обозначенная буквой i , если $U_1 = 2\text{ В}$, $U_2 = 5\text{ В}$, $R_1 = 5\text{ кОм}$, $R_2 = 2\text{ кОм}$?

Поскольку речь идет о токе, надо попробовать применить первый закон Кирхгофа. Разделим цепь замкнутой поверхностью на две части (ее след — штриховая линия на рис. 1.45, б). В алгебраическую сумму входит один ток. Следовательно, $i = 0$, т. е. амперметр покажет ноль.

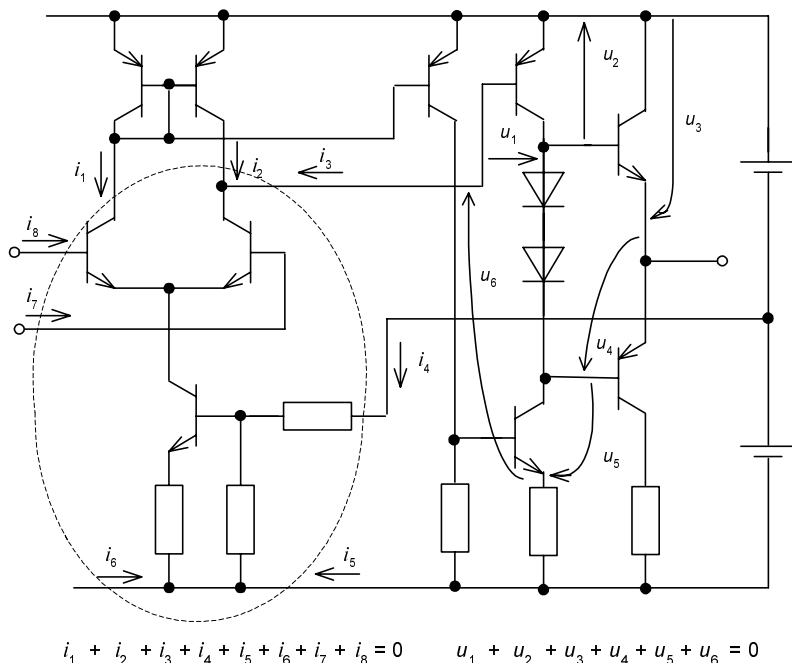


Рис. 1.44

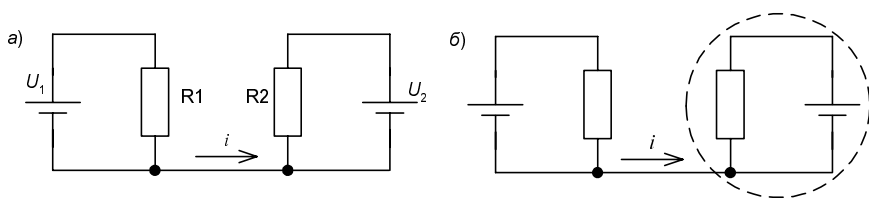


Рис. 1.45

Замечание

Часто в подобных случаях студенты отвечают: "Амперметр ничего не покажет". Это неверно. Амперметр "ничего не покажет", если он неисправен — у него отсутствует стрелка.

Необходимо овладеть графическим методом решения: без него изучать транзисторные цепи невозможно, т. к. характеристики транзисторов существенно нелинейные. Это совсем несложно: надо "поиграть" с вольт-амперными характеристиками и уравнениями Кирхгофа простейшего вида. Единственное необходимое условие — тщательность, внимание — прежде всего к правилам знаков.

Надо освоиться с абстрактными (идеальными) элементами. Например, понять, что источник напряжения, напряжение которого равно нулю, эквивалентен коротке, а источник тока с током, равным нулю — разрыву, что источник напряжения доминирует над всеми элементами, соединенными с ним параллельно, и т. д. Для этого надо опять-таки "поиграть" с идеальными элементами — соединять их последовательно, параллельно и устанавливать, что из этого получится. Например, очень поучителен такой вопрос: чему эквивалентен двухполюсник, состоящий из двух источников напряжения, соединенных параллельно, если значения их напряжений различны? Такой фрагмент схемы замещения бессмыслен, т. к. в рамках теории цепей внутренне противоречив: согласно второму закону Кирхгофа, между его выводами должно быть одно напряжение. Но по определению источника напряжения у каждого из них оно должно быть свое.

Необходимо освоиться с мыслью, что вопросы, которые вы себе задаете, могут оказаться неправильными. Один из примеров мы только что рассмотрели. Вот еще один. В школе вы привыкли рассуждать о резистивных элементах. Например (рис. 1.46, а), на вопрос, чему равна сила тока i_R , если $R = 1$ кОм, а $u_R = 2$ В, вы сразу ответите:

$$i_R = \frac{u_R}{R} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 2 \text{ мА}.$$

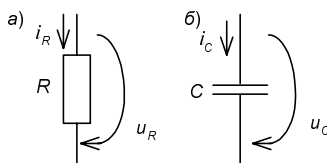


Рис. 1.46

По аналогии у вас может возникнуть вопрос о конденсаторе (рис. 1.46, б): "Чему равна сила тока i_C , если $C = 1$ мкФ, а $u_C = 2$ В?" Этот вопрос поставлен неправильно: в математической модели конденсатора с силой тока связано не напряжение, а производная напряжения по времени:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}.$$

В процессе обучения вы привыкли к корректно сформулированным задачам. Они содержат только необходимые и достаточные данные. Однако при решении реальной задачи специалист сам выбирает данные из огромного их многообразия. При этом оказывается, что большинство из них не являются необходимыми для решения данной задачи — и, вместе с тем, в обозримом множестве данных отсутствуют или не замечены необходимые. Например, в

задаче, которой соответствует рис. 1.45, *а*, значения напряжений и сопротивлений не нужны, а для получения ответа в задаче (рис. 1.46, *б*) не хватает значения производной напряжения.

Решая однотипные задачи, вы постепенно вырабатываете алгоритм (не всегда осознавая это). Он позволяет получать искомый результат, двигаясь **от данных**. Совсем иначе обстоит дело при решении новой задачи. Начиная рассуждать от данных, вы, как правило, будете многократно попадать в тупик. В этом случае надо рассуждать, двигаясь в противоположном направлении — **от искомого**.

Очень эффективен следующий метод овладения теорией. В учебном пособии рассмотрено довольно много задач. Несколько первых решений внимательно прочитайте, осмыслите их и затем решите сами. В дальнейшем же, поняв условие задачи, решите ее самостоятельно. Сравните свой результат с приведенным. Если они совпадают, сопоставьте ход решения; если различаются, найдите причину.

Наконец, еще один практический совет. В процессе решения задачи не ленитесь перечерчивать схемы, иногда неоднократно. В одном случае можно удалить из схемы те элементы, которые при заданном условии в течение какого-то интервала времени не проводят тока — чтобы они не отвлекали вашего внимания. В других случаях целесообразно прибегнуть к структурированию и эквивалентным преобразованиям схем (см. п. 9.8).

Решая учебные задачи, целесообразно руководствоваться следующими правилами:

- ❑ Чертить принципиальные и расчетные схемы, используя стандартные условные графические обозначения элементов цепи (они показаны в главе 2 на рис. 2.1).
- ❑ Однообразно применять буквенные обозначения физических величин.
- ❑ Не допускать пробелов в рассуждениях.
- ❑ Фиксировать все действия на бумаге (ничего не делать в уме): без этого трудно искать ошибки, а они практически неизбежны.

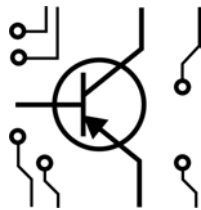
Замечание

Выдающийся математик академик РАН В. И. Арнольд писал: "Каждый работающий математик знает, что если не контролировать себя (лучше всего — примерами), то уже через какой-нибудь десяток страниц половина знаков в формулах будет переврана, а двойки из знаменателей проникнут в числители" (Арнольд В. И. О преподавании математики // Успехи математических наук, 1988. Т. 53, вып. 1 (319). — с. 229—234).

- ❑ Решая числовые задачи, необходимо внимательно следить за единицами измерения величин.

- ❑ Ответ должен быть выражен через исходные данные (в нем не должно быть величин, введенных вами в процессе решения). Если оказалось, что в ответе присутствуют не все данные, необходимо выяснить причину этого.
- ❑ Ход и результаты решения необходимо проверять. Ошибки возможны на разных этапах решения.
 - При формировании мысленной модели изучаемой цепи (ее схемы замещения). Большей частью эта ошибка состоит в том, что не учтены какие-то свойства, в условиях данной задачи являющиеся существенными. Однако иногда объекту приписывают не присущие ему свойства.
 - При преобразованиях буквенных выражений.
 - При вычислениях или работе с графиками.
 - Во всех случаях возможны промахи (описки).
- ❑ Для проверки результата решения существуют разные способы:
 - по размерности;
 - по знаку результата в целом и знакам слагаемых (ориентируясь на направления действия источников и направления отсчета тока и напряжения);
 - по правдоподобию числовых значений — путем сравнения с результатами, полученными посредством грубой оценки ("прикидки");
 - путем решения другим методом;
 - путем решения обратной задачи;
 - путем сравнения значений переменных для $t = 0$ и для $t \rightarrow \infty$, полученных двумя способами: подстановкой данных значений времени в окончательные формулы и решением "асимптотической" статической задачи, в которой из схемы удалены накопители;
 - путем сопоставления временных диаграмм тока и напряжения на выводах каждого элемента с учетом закономерности его поведения;
 - путем выявления доминирующих элементов и учета их характеристик.

ГЛАВА 2



Фрагменты теории электрических цепей

§ 8. Общие сведения

8.1. Понятие электрической цепи и ее состав

Электромагнитное взаимодействие люди используют чрезвычайно широко в материальном производстве, быту, связи, управлении, науке, культуре и других сферах своей деятельности. Электромагнитные взаимодействия — это взаимодействия электромагнитных полей, свойственных микрочастицам и телам. В некоторых случаях электромагнитное поле используется "в чистом виде". Например, при радиосвязи и радиовещании сигнал передается электромагнитными волнами. Однако имеется огромная область применения электромагнитных явлений, для изучения и описания которых понятия, прямо относящиеся к электромагнитному полю, неприменимы. В связи с этим существует и развивается раздел учения об электричестве, именуемый **теорией электрических цепей**. "Цепные" законы и величины однозначно связаны определенными формулами с "полевыми" законами и величинами, но, как уже было сказано, использовать последние для анализа электрических цепей непосредственно невозможно.

Любую электрическую цепь строят для того, чтобы получить некоторый полезный эффект: свечение лампочки, вращение электродвигателя, звучание громкоговорителя в радиоприемнике и т. п. Состав электрической цепи легко выяснить на примере батарейного карманного фонарика. Он содержит следующие электроэлементы, различающиеся своими функциями: батарейку — источник питания, лампочку — приемник (нагрузку), выключатель — управляющий элемент, провода и изоляторы — элементы, служащие для канализации электромагнитного движения. Элементы этих пяти типов содержат все электрические цепи (число экземпляров элементов каждого типа может быть различным). В электронных цепях широко используются накопители — конденсаторы и индуктивные катушки, а также резисторы в качестве вспомогательных элементов (например, токоограничивающего двухполюсника в усилительном каскаде параллельного типа).

8.2. Изображение электрической цепи на бумаге

На бумаге электрические цепи изображают в форме принципиальных электрических схем. Они состоят из **условных графических обозначений** (УГО) элементов цепи, соединенных между собой линиями, обозначающими провода (изоляторы на схемах не показывают — их наличие подразумевается). УГО стандартизованы. Размеры их никак не связаны с размерами реальных элементов цепи и тоже стандартизованы. С самого начала изучения электрических цепей надо стремиться чертить УГО возможно ближе к установленным ГОСТами.

На рис. 2.1 показаны УГО, которыми мы будем пользоваться наиболее часто. Здесь 1 — электрохимический источник питания, 2 — биполярный транзистор типа $n-p-n$, 3 — диод, 4 — резистор, 5 — конденсатор, 6 — индуктивная катушка, 7 — замыкающие контакты (в отсутствие воздействия — разомкнутые), 8 — размыкающие контакты (в отсутствие воздействия — замкнутые). К сожалению, ГОСТом не предусмотрено обозначение для любых источников питания. Поэтому мы будем пользоваться в качестве общего символом 1 на рис. 2.1.

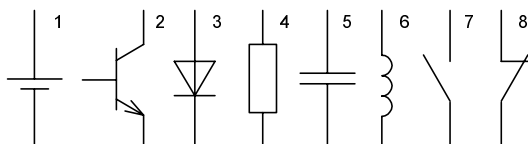


Рис. 2.1

Правила соединений проводов тоже оговорены ГОСТом. Они показаны на рис. 2.2: провода не соединены (а); провода соединены (б—г). Во избежание ошибок (забыли поставить точку) обозначение (б) использовать нецелесообразно. Вместо него следует применить расположенные рядом Т-образные соединения (рис. 2.2, д, е).

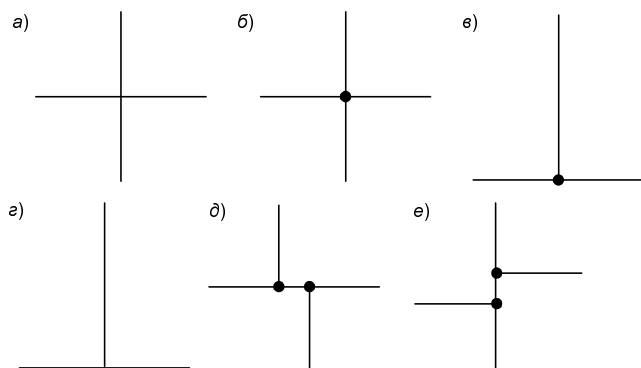


Рис. 2.2

8.3. Электрические переменные

Как мы уже говорили, для **непосредственного** наблюдения электромагнитных явлений организм человека не содержит подходящих анализаторов (органов чувств). Поэтому единственная возможность судить о процессах в электрических цепях — наблюдать и анализировать показания электроизмерительных приборов. При изучении электрических цепей основными переменными считают силу тока и электрическое напряжение.

Замечание

В учебниках физики и теории электрических цепей в качестве основной называют еще одну величину — электродвижущую силу (ЭДС), утверждая, будто она служит причиной тока. Данное суждение не имеет объективного обоснования, ввиду чего ЭДС — лишнее, сорное понятие, затрудняющее изучение электрических цепей.

Поскольку они — **алгебраические** величины (им присущи знаки), измерительные приборы должны быть чувствительны к полярности напряжения и направлению тока. Таковыми являются стрелочные приборы магнитоэлектрической системы, цифровые приборы и электронные осциллографы. В ближайших рассуждениях мы будем ориентироваться на стрелочные приборы с нулевой отметкой посередине шкалы и их упрощенные изображения в виде кружка (рис. 2.3). Зажим (клемму), обозначенный короткой черточкой, назовем "минусовым".

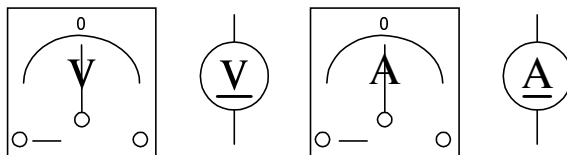


Рис. 2.3

Наряду с силой тока (часто называемой просто током) и напряжением используют физические величины, являющиеся интегралами и производными по времени тока и напряжения. Первые имеют специальные названия и буквенные обозначения: электрический заряд $q = \int i dt$ и потокосцепление $\Psi = \int u dt$. *Потокосцепление* — чрезвычайно неудачный термин. Он настолько неправильно ориентирует, что ввел в заблуждение даже специалистов по теоретическим основам электротехники: в специальном документе (терминологическом ГОСТе) ему дали определение, лишенное физического смысла. Чтобы освободиться от этой нелепости, мы введем для величины, равной интегралу напряжения по времени, другое имя — "вольт-секундная площадь" — и иное обозначение: $\sigma = \int u dt$.

Рассуждая теоретически, по-видимому, основными величинами разумно было бы считать q и σ . Но их значительно сложнее измерять, чем i и u .

Производные по времени тока и напряжения специальных названий и буквенных обозначений не имеют.

8.4. Направления отсчета напряжений и токов (правила знаков)

Теория любой естественной или технической науки нужна, в конечном счете, для того, чтобы найти воплощение в практике. Поэтому правила сопоставления теории с практикой являются важнейшей составной частью теории. При изучении электрических цепей сравнивают измеренные значения величин с вычисленными и экспериментально снятые зависимости между величинами с выведенными теоретически.

Так как "цепные" переменные — алгебраические величины, важно научиться и теоретически, и в эксперименте устанавливать их знаки. Это несложно, но требует внимания. Рассмотрим соответствующие правила.

Электрохимический источник питания и его УГО соответствуют друг другу, как показано на рис. 2.4.

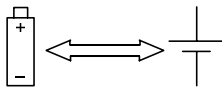


Рис. 2.4

Знаки полярности полюсов элемента питания согласованы с минусовыми клеммами вольтметров в соответствии с рис. 2.5. Положение стрелки прибора в правой половине шкалы означает, что отсчет положителен, в левой — что он отрицателен (то есть $u_1 > 0$; $u_2 < 0$).

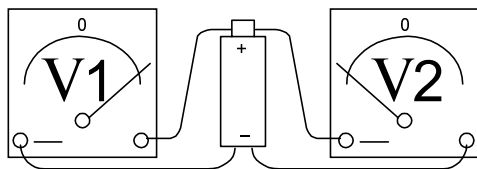


Рис. 2.5

Аналогично (рис. 2.6) согласованы минусовые клеммы и показания амперметров с направлением тока в проводах (положительным принято считать ток, вытекающий из положительного полюса источника — см. стрелки на рис. 2.6).

Осциллограф реагирует на знак напряжения электрического поля, как показано на рис. 2.7 (большей частью минусовый вывод осциллографа соединен с его металлическим корпусом).

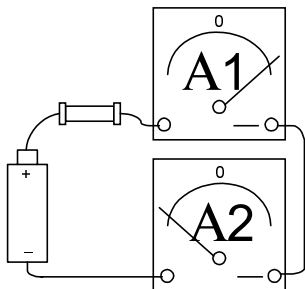


Рис. 2.6.

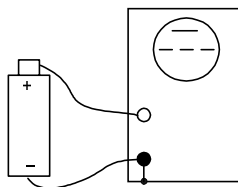


Рис. 2.7

При теоретическом изучении любой, даже наипростейшей цепи нельзя написать ни одной формулы (даже закона Ома), если на схеме не показано, как включены измерительные приборы, поскольку в этом случае неизвестны знаки величин. Вычерчивать изображения приборов подобно тому, как на рис. 2.3, 2.5, 2.6 и рис. 2.7, нерационально — и долго, и требует много места на бумаге. Поэтому были придуманы наиболее простые условные графические обозначения приборов в виде стрелок, острие которых направлено в ту же сторону, что и минусовые клеммы вольтметра и амперметра (это соответствие показано на рис. 2.8). Разумно называть их направлениями отсчета напряжений и токов.

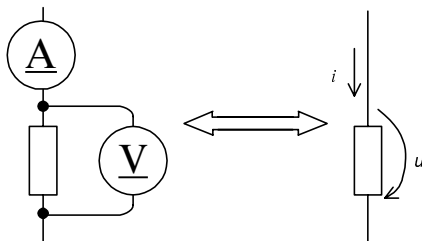


Рис. 2.8

Замечание

В литературе значения стрелок на схемах трактуют обычно иначе: говорят, что это — "условно-положительные направления" напряжения и тока. Такая формулировка не позволяет однозначно связать теорию с практикой.

8.5. Законы теории электрических цепей

Электрическая цепь представляет собой систему, состоящую из элементов (компонентов). В соответствии с системным подходом законы теории электрических цепей делят на структурные и компонентные. Первые определяют

ся только структурой (топологией) цепи и не зависят от особенностей составляющих цепь элементов. Вторые, напротив, описывают специфические особенности компонентов и безразличны к месту расположения их в цепи.

Структурных законов два: закон Кирхгофа для токов (первый закон Кирхгофа) и закон Кирхгофа для напряжений (второй закон Кирхгофа). Познакомимся с их современными формулировками.

Первый закон Кирхгофа относится к **сечению** цепи. Мысленно разделим (рассечем) цепь замкнутой поверхностью на две части любым из двух способов, показанных на рис. 2.9 (след секущей поверхности показан штриховой линией). Во всех местах, где провода пересекают поверхность, включим измерители тока, одинаково ориентированные по отношению к ней (см. стрелки — направления отсчета на рис. 2.9). Тогда в любой момент времени алгебраическая сумма их показаний будет равна нулю:

$$\sum_{l=1}^n i_l(t) = 0.$$

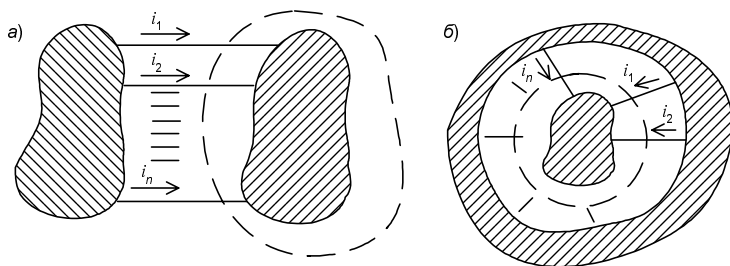


Рис. 2.9

В качестве примера напомним первый закон Кирхгофа для транзистора (рис. 2.10, а):

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0.$$

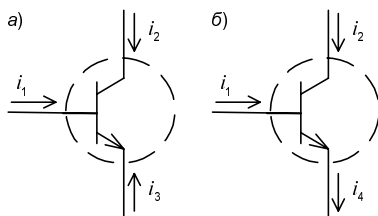


Рис. 2.10

Направления отсчета тока необязательно выбирать одинаковыми (как на рис. 2.9 и рис. 2.10, *а*). Например, можно начертить стрелки как показано на рис. 2.10, *б*. Что при этом изменится в написании закона Кирхгофа? Изменение направления отсчета на противоположное соответствует перемене на противоположное мест подключения проводов, идущих к амперметру. Очевидно, при этом изменится знак показания амперметра, т. е.

$$i_4 = -i_3.$$

Следовательно, уравнение надо написать так:

$$i_1(t) + i_2(t) - i_4(t) = 0$$

или

$$i_1(t) + i_2(t) = i_4(t).$$

Второй закон Кирхгофа относится к **контур**у. Если мы соединим в кольцо ("многоугольник") разноименными клеммами n измерителей напряжения, и места их соединения (вершины многоугольника) подключим к произвольным точкам цепи (рис. 2.11), то в любой момент времени алгебраическая сумма их показаний окажется равной нулю:

$$\sum_{l=1}^n u_l(t) = 0.$$

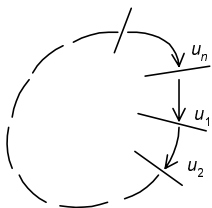


Рис. 2.11

Например, для транзистора (рис. 2.12, *а*) второй закон Кирхгофа запишется следующим образом:

$$u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) = 0.$$

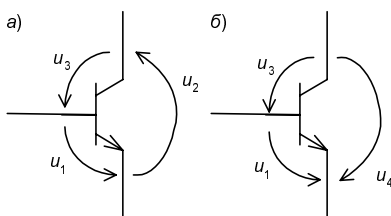


Рис. 2.12

Опять-таки необязательно все направления отсчета выбирать одинаковыми, как на рис. 2.12, *а*. Они могут быть произвольными (рис. 2.12, *б*). Принимая во внимание, что изменение направления отсчета соответствует изменению знака показания прибора, уравнение Кирхгофа надо написать иначе:

$$u_1(t) - u_4(t) + u_3(t) = 0$$

или

$$u_1(t) + u_3(t) = u_4(t).$$

Займемся компонентными законами.

Элемент электрической цепи состоит из "тела" и **выводов (полюсов)** — металлических проводников, которыми его присоединяют к выводам других элементов. По числу выводов элементы делят на **двухполюсники** и **многополюсники**. Однополюсников нет и быть не может, т. к. ток течет только в замкнутой цепи (электрический заряд не накапливается). Следовательно, чтобы он мог втекать через один вывод, обязательно должен быть хотя бы еще один вывод, через который он будет вытекать. Простейшие и наиболее распространенные многополюсники — **трехполюсники**, к числу которых принадлежат и транзисторы.

Поведение элемента электрической цепи описывают в виде функциональной связи между переменными (сила тока, напряжение, производные и интегралы по времени от этих величин), измеренными на выводах элемента. Эта функциональная связь представляет собой математическую модель элемента или, что то же самое, компонентный закон.

С некоторыми компонентными законами вы давно знакомы. Например, так называемый закон Ома для участка цепи — не что иное, как простейшая математическая модель резистора. Необходимо только иметь в виду, что при разных согласованиях направлений отсчета напряжения и тока знаки в формуле оказываются различными. Так, при согласном отсчете напряжения и тока (стрелки направлены одинаково, рис. 2.13, *а*) мы имеем привычную форму:

$$u_R(t) = Ri_R(t),$$

а при встречном (рис. 2.13, *б*) — непривычную, но столь же "законную":

$$u_R(t) = -Ri_R(t).$$

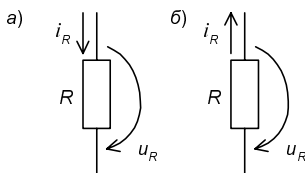


Рис. 2.13

Наряду с параметром резистора — сопротивлением R — используют обратную ему величину, именуемую проводимостью, $G = 1/R$. Она удобна для описания параллельного соединения резисторов: формулы оказываются "одноэтажными", а не "двухэтажными". Закон Ома при этом выглядит так:

$$i_R(t) = Gu_R(t) \quad (\text{или} \quad i_R(t) = -Gu_R(t)).$$

Известна вам также простейшая математическая модель конденсатора. При согласном отсчете тока и напряжения она имеет вид

$$q_C = Cu_C$$

или

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}.$$

Ей аналогична простейшая математическая модель индуктивной катушки:

$$\varphi_L = Li_L$$

или

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}.$$

Функциональные связи между переменными, которыми описывают поведение основных элементов транзисторных цепей — транзисторов и диодов — **существенно нелинейны**. Это значит, что при теоретическом анализе их работы **пренебрегать нелинейностью нельзя** — в противном случае получится результат, не имеющий ничего общего с реальностью. Формулы, которыми описывают поведение транзистора и диода, имеются. Для биполярного транзистора это модель Эберса—Молла, для диода — формула Шотки. Однако для анализа работы транзисторных цепей "вручную", т. е. без применения ЭВМ, что необходимо каждому инженеру, они мало подходят. Поэтому компонентные законы, отображающие поведение транзисторов, диодов и других полупроводниковых элементов, представляют в графической форме — в виде **вольт-амперных характеристик (ВАХ)**. Умение работать с ними является необходимым условием достижения понимания принципа действия транзисторных цепей.

8.6. Энергетические соотношения

Мгновенная мощность, измеренная между выводами элемента цепи при **согласном** отсчете напряжения и тока (как на рис. 2.13, *а*), выражается формулой:

$$P(t) = u(t)i(t).$$

Если оказалось, что $P(t) > 0$, значит, элемент потребляет электромагнитное движение. В противном случае он служит источником движения. Так, например, в цепи, содержащей электрохимический элемент и резистор (рис. 2.14), $u_U = u_R$ и $i_U = i_R$, согласно правилам знаков, положительны. Напряжение u_R и ток i_R отсчитываются согласно. Следовательно, $P_R > 0$ — ре-

зистор потребляет движение (принято говорить "потребляет энергию") и в результате этого нагревается. Напряжение $u_{\text{И}}$ и ток $i_{\text{И}}$ отсчитываются встречно. Следовательно, $P_{\text{И}} < 0$, т. е. источник отдает движение (энергию).

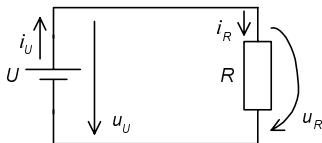


Рис. 2.14

Изменение энергии находят по формуле

$$\Delta W = \int P dt.$$

Отсюда сразу выводится закон Джоуля—Ленца. Воспользовавшись законом Ома, имеем:

$$P = ui = Ri \cdot i = Ri^2.$$

Если ток постоянен и равен I , проинтегрировав по времени, получим

$$\Delta W = RI^2 \Delta t.$$

Так же просто найти энергию конденсатора и катушки. При согласном отсчете напряжения и тока их простейшие математические модели:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}; \quad U_L = L \frac{di_L}{dt}.$$

Подставив их в формулу для мощности и проинтегрировав, получим:

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}; \quad W_L = \frac{Li_L^2}{2}.$$

8.7. Основные особенности структуры электронной цепи

Рассмотрим некоторые геометрические (структурные) особенности электрических цепей. Хотя в настоящее время подавляющую часть транзисторных цепей производят в виде так называемых интегральных микросхем, их отличие, по существу, только технологическое. Принцип же действия их практически не отличается от принципа действия транзисторных устройств, изготовленных из дискретных (одиночных) компонентов — транзисторов, резисторов и др. Об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что принципиальные электрические схемы и тех, и других идентичны. Сказанное позволяет изучать процессы в транзисторных цепях как таковых независимо от технологии их изготовления.

На рис. 2.15, *а* изображен фрагмент (участок) электронной цепи. Он состоит из соединенных между собой элементов (чтобы не загромождать чертеж, детали их механического крепления не показаны). На рисунке мы видим следующие элементы: 2, 15 — конденсаторы, 3, 6, 9, 13 — резисторы, 11 — транзистор (внешний вид элементов может отличаться от показанного, т. к. их конструкции разнообразны; тем более иначе они выглядят в интегральных микросхемах). Двухполюсниками на рис. 2.15, *а* являются резисторы и конденсаторы, трехполюсником — транзистор. Место, где выводы элементов соединены между собой, называют **узлом**.

Замечание

В литературе **узлом** часто называют только те места, где соединены три и более выводов. Это создает неудобство при использовании для анализа цепей теории графов. Если узлом называть место соединения любого числа выводов, в том числе двух, то узлы, где соединены выводы трех или более элементов, можно называть "многолучевыми".

На рис. 2.15, *а* узлами являются точки 4—5, 7, 8, 10 и 12. Обратите внимание: точки 4 и 5 образуют не два узла, а один (заклученный между ними участок провода двухполюсником не считают). В точках 1 и 17 данный фрагмент цепи соединен с другими, на рисунке не показанными. Провода 14 и 16 идут к источнику питания.

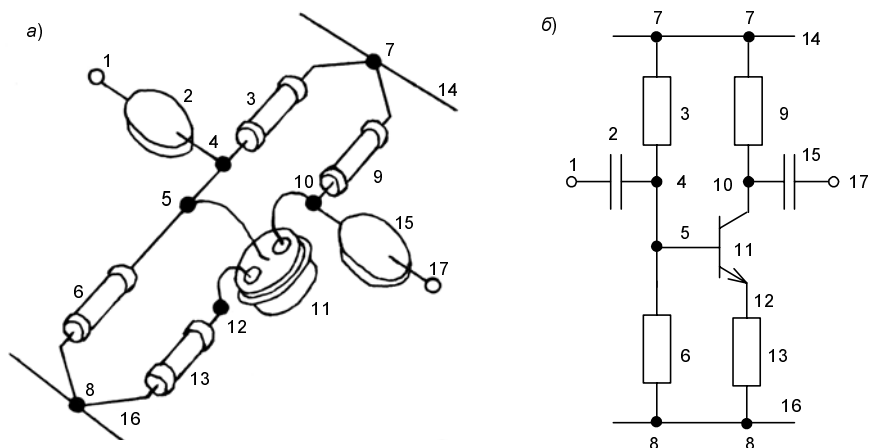


Рис. 2.15

Схематическое изображение рассматриваемого фрагмента цепи (схема электрическая принципиальная) показано на рис. 2.15, *б*. Схема служит не чертежом, а условным изображением цепи. Поэтому не все особенности геометрии цепи находят в ней отражение. Например, как уже указывалось,

размер условных графических обозначений элементов никак не связан с размером самих элементов.

Часто повторяющиеся разновидности соединений элементов цепи немногочисленны. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Последовательное соединение. Два двухполюсника называют соединенными последовательно в том случае, если один вывод одного двухполюсника соединен с одним выводом другого, а вторые их выводы не соединены между собой. Такая композиция может рассматриваться как целое, т. е. тоже является двухполюсником. Последовательно может быть соединено произвольное число двухполюсников (рис. 2.16, а). Эта система — тоже двухполюсник. Если двухполюсник соединен с одним из выводов многополюсника (рис. 2.16, б), можно сказать, что он включен последовательно с этим выводом.

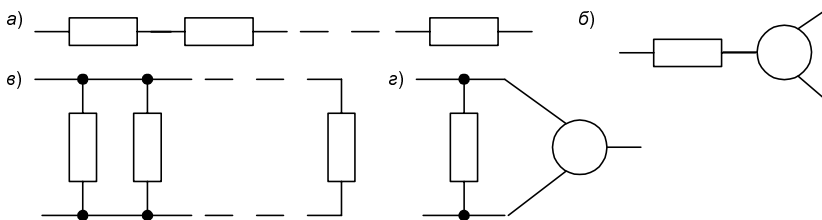


Рис. 2.16

Параллельное соединение. Два двухполюсника называют соединенными параллельно в том случае, если каждый вывод одного двухполюсника соединен с одним выводом другого. Параллельно можно соединить произвольное число двухполюсников (рис. 2.16, в), причем образовавшаяся система также является двухполюсником. В случае аналогичного соединения двухполюсника с многополюсником (рис. 2.16, г) можно говорить, что двухполюсник подключен параллельно таким-то выводам многополюсника.

Двухполюсник, содержащий один или несколько последовательно соединенных двухполюсников и имеющий своими границами выводы многополюсников или многолучевые узлы, называют **ветвью**. По аналогии с ветвью можно выделить как целое двухполюсник, содержащий все параллельно включенные двухполюсники, и назвать его, например, **кистью**. Границами кисти служат последовательно присоединенные элементы.

Двухполюсники могут быть соединены так, что образуется многополюсник. Различают два типа таких соединений — звездой и многоугольником (на рис. 2.17, а, б показаны трехлучевая звезда и треугольник).

По отношению к другим элементам цепи многополюсник может вести себя как элемент с меньшим числом выводов, если какие-то его выводы соединены между собой. Например, транзистор, у которого выводы коллектора и базы соединены (рис. 2.17, в), является двухполюсником.

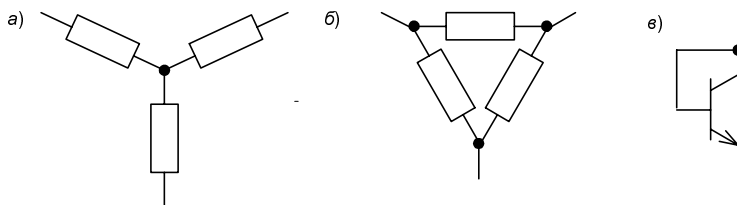


Рис. 2.17

8.8. Составление и решение системы уравнений

Без специального обсуждения ясно, что в систему уравнений электрической цепи должны входить компонентные законы, описывающие поведение всех ее элементов. Что касается структурных законов, то существуют разные методы их составления. Прежде всего, это составление самих уравнений Кирхгофа. Кроме того, есть основанные на уравнениях Кирхгофа метод узловых напряжений и метод контурных токов. Разработаны правила составления необходимого и достаточного числа системных уравнений, в том числе в матричной форме (они изложены в учебниках по теории электрических цепей).

Так как нашей задачей является понимание принципов построения транзисторных цепей и процессов в них, на вычислительных методах мы останавливаться не будем. При решении тех небольших по объему задач, которые необходимы для понимания, мы будем применять метод исключения переменных, используя необычный, но очень удобный прием. Состоит он в том, что процедура анализа не разбивается на две стадии (первая — составление системы уравнений, и вторая — ее решение). Уравнения пишем и одновременно решаем, исключая переменные. Легче всего понять существо приема, рассмотрев пример (рис. 2.18). Допустим, необходимо выразить i_3 через данные, т. е. U , R_1 , R_2 и R_3 (кружочком со стрелкой внутри обозначен идеальный элемент — источник напряжения, см. рис. 2.30 и комментарии к нему).

Начинаем рассуждать от искомого, т. е. i_3 . Как его проще всего выразить? Разумеется, с помощью закона Ома: $i_3 = u_3/R_3$.

Появилось новое неизвестное: u_3 . Его проще всего выразить через u_2 : $u_3 = u_2$.

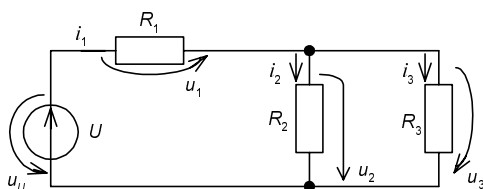


Рис. 2.18

Для u_2 опять-таки проще всего воспользоваться законом Ома: $u_2 = R_2 i_2$.

И так далее: движемся "от точки к точке". Записывать все это удобно без слов, в форме "лестницы", что и продемонстрировано далее.

$$\begin{array}{lcl}
 i_3 = \frac{u_3}{R_3} & & \\
 | & & \\
 u_3 = u_2 & & \\
 | & & \\
 u_2 = R_2 i_2 & & \\
 | & & \\
 i_2 = i_1 - i_3 & \text{(Переменная } i_3 \text{ уже была — для нее писать уравнение не надо)} & \\
 | & & \\
 i_1 = \frac{u_1}{R_1} & & \\
 | & & \\
 u_1 = u_U - u_3 & \text{(Переменная } u_3 \text{ уже была)} & \\
 | & & \\
 u_U = U & \text{(Новые неизвестные не появились. Движемся в обратном направлении, исключая переменные)} & \\
 | & & \\
 u_1 = U - u_3 & & \\
 | & & \\
 i_1 = \frac{U - u_3}{R_1} & & \\
 | & & \\
 i_2 = \frac{U - u_3}{R_1} - i_3 & & \\
 | & & \\
 u_2 = \frac{R_2}{R_1} (U - u_3) - R_2 i_3 & & \\
 | & & \\
 u_3 = \frac{R_2}{R_1} (U - u_3) - R_2 i_3 & \text{(Обнаружились подобные члены (с } u_3 \text{)). Их надо сгруппировать и решить уравнение)} & \\
 (R_1 + R_2) u_3 = R_2 U - R_1 R_2 i_3 & & \\
 u_3 = \frac{R_2 U}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i_3 & & \\
 | & & \\
 R_3 i_3 = \frac{R_2 U}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i_3 & & \\
 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) i_3 = \frac{R_2 U}{R_1 + R_2} & & \\
 i_3 = \frac{R_2 U}{R_1 R_2 + (R_1 + R_2) R_3} & &
 \end{array}$$

8.9. Границы применимости вышеизложенного

Существуют ли какие-либо ограничения на применение законов Кирхгофа и компонентных законов? Несомненно. Надо постоянно помнить, что любая теория — мысленная модель, относительная истина, и стараться уяснить границы ее применимости. Рассмотрим их.

Используя уравнения Кирхгофа, мы полагаем, что провода идеальны — т. е. для любого провода произвольной длины и формы, а также любого момента времени справедливы следующие утверждения:

- Сила тока, измеренная во всех сечениях, одинакова.
- Провод является эквипотенциальным участком цепи, т. е. напряжение, измеренное между его произвольными точками, равно нулю.

В большинстве практических случаев эти допущения оправданы. Отклонения от них обусловлены следующими обстоятельствами.

Скорость распространения электромагнитных волн конечна (не бесконечно велика). Отсюда следует, что сформулированные выше допущения справедливы в тех случаях, когда размер электронного устройства значительно меньше длины волны колебаний, которые в нем происходят.

Закон Ома для участка цепи (являющийся простейшей математической моделью резистора) далеко не всегда удовлетворительно описывает его поведение. Дело в том, что протекание электрического тока эквивалентно наличию магнитного поля (это — две стороны одного явления). Переменное магнитное поле и, следовательно, переменный ток связаны с напряжением: $u = L di/dt$. Для отображения этого факта недостаточно замещать резистор одним резистивным элементом — приходится дополнять его индуктивным элементом. Далее. Между различными (по длине) точками резистора имеется электрическое поле. Если оно переменное, течет переменный ток $i = C du/dt$, чему соответствует емкостный элемент. Кроме того, для учета тепловых флуктуаций иногда в схему замещения резистора вводят источник тока или напряжения.

Аналогично индуктивную катушку и конденсатор иногда замещают не индуктивным и емкостным элементом соответственно, а схемами, содержащими несколько разных идеальных элементов.

В ряде случаев приходится использовать модели "с распределенными параметрами". Наконец, иногда приходится применять непосредственно уравнения Максвелла.

§ 9. Статический режим работы электрической цепи

9.1. Виды вольт-амперных характеристик двухполюсников

Изучая статический режим работы электрической цепи (см. п. 6.3), накопителями пренебрегают, т. е. рассматривают только источники и диссипаторы. Поведение и тех, и других описывают вольт-амперными характеристиками, но вид их существенно различается. ВАХ источников не проходят через ноль, диссипаторов — проходят. На рис. 2.19, *а* показана ВАХ источника — солнечного фотоэлемента (элемента солнечной батареи, фотогенератора), снятая при встречном отсчете напряжения и силы тока (рис. 2.19, *б*) при определенном значении светового потока.

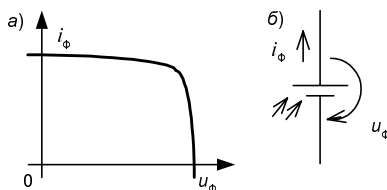


Рис. 2.19

Познакомимся с классификацией ВАХ диссипативных двухполюсников (характеристики сняты при согласном отсчете напряжения и тока). Прежде всего, их делят на **симметричные** (рис. 2.20, *а*) и **несимметричные** (рис. 2.20, *б*). Первым свойственно равенство $i(-u) = -i(u)$, вторым — не свойственно.

По форме кривой в одном квадранте (рис. 2.20, *в*) характеристики можно разделить на:

- ☐ ВАХ с отклонением к оси тока (1);
- ☐ с отклонением к оси напряжения (2);
- ☐ с возвратом к оси тока (3);
- ☐ с возвратом к оси напряжения (4);
- ☐ гистерезисные с возвратом к оси тока (5);
- ☐ гистерезисные с возвратом к оси напряжения (6).

Замечание

В литературе ВАХ вида 3 часто называют S-образной, а ВАХ вида 4 — N-образной. Эти названия были бы приемлемы, если бы по оси абсцисс всегда откладывали напряжение.

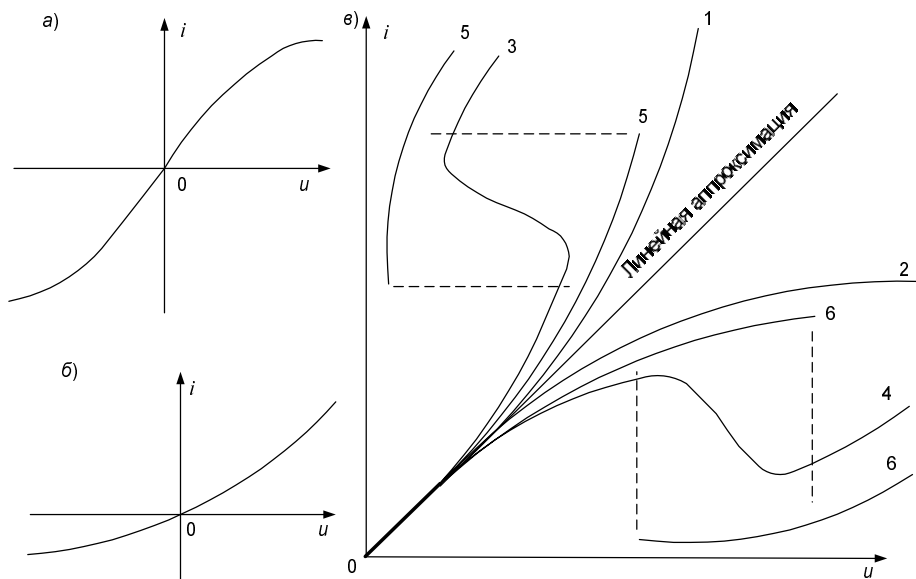


Рис. 2.20

На характеристиках вида 3 и 4 имеются участки, называемые **падающими**, в пределах которых дифференциальное сопротивление du/di отрицательно. Двухполюсники, которым свойственны такие характеристики, часто называют **негатронами**.

9.2. Управляемые двухполюсники. Трехполюсники

Мы уже говорили о некоторых конкретных двухполюсниках — батарее, лампочке, выключателе и др. Выключатель существенно отличается от остальных: его ВАХ зависит от неэлектрического (в данном случае — механического) воздействия — нажатия пальцем. Выключатель — не единственный двухполюсник такого типа. Можно назвать, например, еще резистор переменного сопротивления, конденсатор переменной емкости и др. Есть двухполюсники, управляемые не механически, а другими воздействиями — световым (фотоэлемент, фотодиод и фоторезистор), тепловым (терморезистор) и т. д. Иными словами, есть целый класс элементов, отличающихся описанным свойством. Назовем их **управляемыми двухполюсниками**.

Сообразим, как должна выглядеть статическая характеристика управляемого двухполюсника. Очевидно, это должна быть связь трех переменных:

$$f(u, i, x) = 0,$$

где x — переменная, которой отображают неэлектрическое воздействие. Взаимосвязь двух переменных геометрически представляет собой плоскую кривую, а связь трех переменных — трехмерную поверхность. Люди давно придумали способ представлять трехмерную поверхность на плоскости (вспомним "горизонталь" — линии равной высоты на географических картах). В электронике аналогичное множество кривых называют **семейством характеристик**. На рис. 2.21 в качестве примера показано семейство характеристик фотодиода.

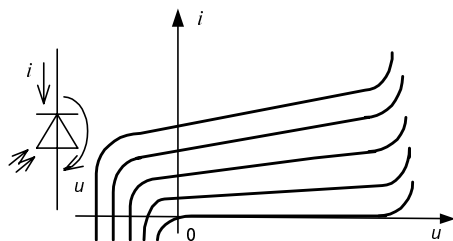


Рис. 2.21

Займемся статическими характеристиками трехполюсника (рис. 2.22).

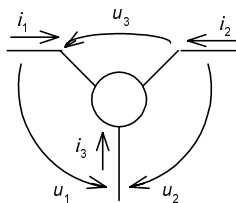


Рис. 2.22

С первого взгляда может показаться, что его поведение описывают взаимосвязью шести переменных — трех напряжений и трех токов. Однако, воспользовавшись уравнениями Кирхгофа, одно напряжение можно выразить через два других, и один ток — тоже через два других. Поэтому поведение трехполюсника в статическом режиме описывают взаимосвязью четырех переменных — двух токов и двух напряжений. Какие именно пары переменных выбрать, говоря абстрактно, безразлично. Но т. к. трехполюсник большей частью используют в качестве управляющего элемента в усилительном каскаде, то разумно взять входные и выходные переменные. Они всегда связаны между собой **парой** уравнений, например:

$$\left. \begin{aligned} f_1(u_1, i_1, u_2) &= 0 \\ f_2(i_2, i_1, u_2) &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Уравнения можно разрешить относительно двух переменных, например:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= F_1(i_1, u_2) \\ i_2 &= F_2(i_1, u_2) \end{aligned} \right\},$$

где i_1 и u_2 **выглядят** как аргументы. Кроме них в этой роли может выступать любая другая пара переменных, например $\{u_1, u_2\}$ и $\{i_1, i_2\}$. С конкретным видом семейств характеристик трехполюсника мы познакомимся на примере характеристик транзистора (см. § 11).

9.3. Большой и малый сигналы

Главными элементами электронных цепей, определяющими принцип их действия, служат так называемые электронные приборы — транзисторы, тиристоры, диоды и др.

Замечание

Электронные приборы — название явно неудачное. "Приборами" одновременно называют осциллографы, частотомеры, электронные вольтметры и т. п., компонентами электрических цепей которых служат опять-таки электронные приборы.

Их характеристики существенно нелинейны, т. е. при анализе электронных цепей игнорировать нелинейность нельзя. Однако по назначению электронные устройства весьма разнообразны. В одних случаях нелинейность играет принципиальную роль (например, в выпрямителях и логических элементах). Режим работы электронных приборов в таких устройствах называют **режимом большого сигнала**. В других же случаях нелинейность надо учесть только один раз — в самом начале исследования, когда определяют постоянные составляющие токов и напряжений (см. дальше). А в последующей, основной стадии анализа можно пользоваться линейной аппроксимацией характеристик. Такой режим работы электронного прибора называют **режимом малого сигнала**. Его применяют в аналоговых элементах.

Разновидность режима большого сигнала транзисторов, отличающуюся тем, что электронный прибор то проводит (открыт), то не проводит (заперт), т. е. работает наподобие выключателя, называют **режимом переключения**.

Общего математического метода решения нелинейных задач не существует. Основным методом анализа режима большого сигнала при изучении и осмыслении принципа действия транзисторных цепей служит графический метод.

В ряде случаев, особенно при анализе переходных процессов, используют кусочно-линейную аппроксимацию нелинейных характеристик, позволяющую применить линейные методы для каждого участка.

9.4. Графический метод анализа

Вспомним школьную задачу в несколько необычной постановке. Допустим, имеется электрическая цепь, состоящая из батарейки, лампочки, соединительных проводов и двух приборов (рис. 2.23). Какими данными необходимо располагать и как с ними следует поступить, чтобы теоретически предсказать показания амперметра и вольтметра, если можно пренебречь сопротивлением первого и проводимостью второго? (Попробуйте ответить на этот вопрос самостоятельно).

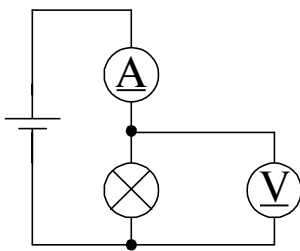


Рис. 2.23

Согласно учебникам, надо знать ЭДС батарейки E , ее внутреннее сопротивление R_B и сопротивление лампочки R_L . Силу тока I следует вычислить, воспользовавшись законом Ома для полной цепи

$$I = \frac{E}{R_B + R_L},$$

а напряжение U_L между выводами лампочки — применив закон Ома для участка цепи:

$$U_L = R_L I.$$

Это неверно. Дело в том, что вольт-амперные характеристики батарейки и особенно лампочки нелинейны (рис. 2.24). Поэтому указать значения R_B и R_L невозможно.

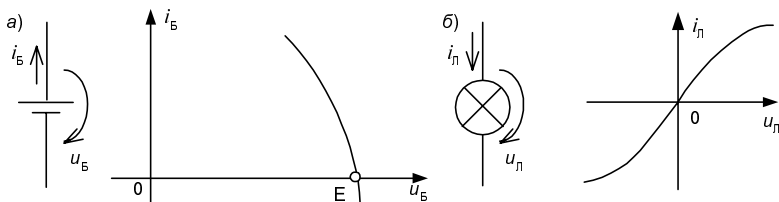


Рис. 2.24

Решим задачу графически. Для этого надо написать структурные законы — уравнения Кирхгофа и компонентные законы для всех элементов цепи. Обратимся к схеме на рис. 2.25.

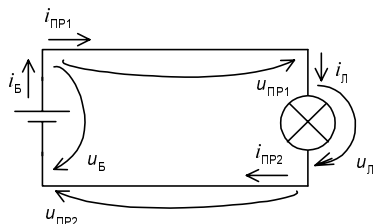


Рис. 2.25

Применив первый закон Кирхгофа к каждой паре токов, получим:

$$i_B = i_{\text{ПР1}} = i_L = i_{\text{ПР2}}. \quad (9.1)$$

Второй закон Кирхгофа дает:

$$u_{\text{ПР1}} + u_L + u_{\text{ПР2}} = u_B. \quad (9.2)$$

Два компонентных закона мы уже имеем — в форме ВАХ на рис. 2.24:

$$i_B = f_1(u_B); \quad (9.3)$$

$$i_L = f_2(u_L). \quad (9.4)$$

Компонентные законы для проводов:

$$u_{\text{ПР1}} = R_1 i_{\text{ПР1}}; \quad u_{\text{ПР2}} = R_2 i_{\text{ПР2}}.$$

Строя электрические цепи, провода всегда выбирают такими, чтобы напряжениями между их концами можно было пренебречь. Поэтому уравнения (9.1) и (9.2) упростятся:

$$i_B = i_L; \quad (9.5)$$

$$u_B = u_L. \quad (9.6)$$

Принимая во внимание равенство (9.6), подставим компонентные соотношения (9.3) и (9.4) в уравнение (9.6):

$$f_1(u_L) = f_2(u_L).$$

Из него следует, что для получения ответа надо найти точку пересечения функций f_1 и f_2 , начертив ВАХ на одной координатной плоскости (рис. 2.26). Координаты этой точки U_x и I_x есть искомые значения напряжения и тока.

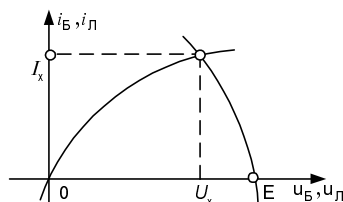


Рис. 2.26

Рассмотрим более сложную — трехкомпонентную — цепь (рис. 2.27, а). ВАХ диода показана на рис. 2.27, б.

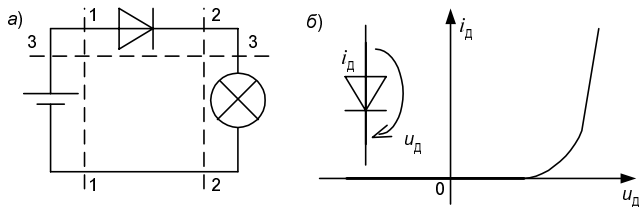


Рис. 2.27

Задачу можно свести к предыдущей, разделив цепь на два двухполюсника одним из трех способов — по линиями 1—1, 2—2 или 3—3. Предположим, мы выбрали линию 2—2. Тогда, чтобы решить задачу уже известным способом, надо найти ВАХ двухполюсника, показанного на рис. 2.28, а. Обозначим направления отсчета всех переменных (рис. 2.28, б) и напомним уравнения Кирхгофа:

$$i_{БД} = i_1 = i_2; \quad (9.7)$$

$$u_{БД} = u_1 + u_2. \quad (9.8)$$

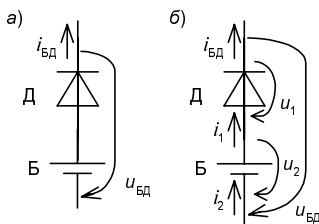


Рис. 2.28

Из них следует, что для получения ВАХ двухкомпонентного двухполюсника необходимо при одинаковых значениях тока сложить значения напряжения. Это — чисто чертежная операция. Надо только не запутаться в знаках. Обратим внимание на то, что направления отсчета u_D на рис. 2.27, б и u_1 на рис. 2.28, б противоположны. Это значит, что, заменив в уравнении (9.8) u_1 на u_D , второе следует взять с противоположным знаком:

$$u_{БД} = -u_D + u_Б.$$

На рис. 2.29 показана процедура построения одной точки искомой кривой для значения тока $i_D = i_Б = i^*$, а также вся искомая характеристика.

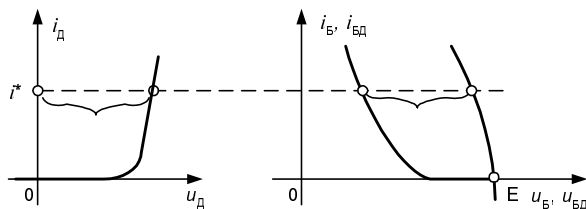


Рис. 2.29

Получим вольт-амперную характеристику часто встречающегося двухполюсника, состоящего из соединенных последовательно источника питания и резистора (вспомним: такой фрагмент имеется в параллельных схемах усилительных каскадов например, U и R_{TO} на рис. 1.22, б). В большинстве современных электронных устройств применяют стабилизированные источники питания. Одно из главных их отличий состоит в том, что напряжение источника почти не зависит от силы тока, т. е. его ВАХ представляет собой прямую, практически параллельную оси тока. Это обстоятельство служит одним из оснований для введения идеального элемента (мысленной модели), ВАХ которого строго параллельна оси тока (рис. 2.30, а). Его условное графическое обозначение показано на рис. 2.30, б.

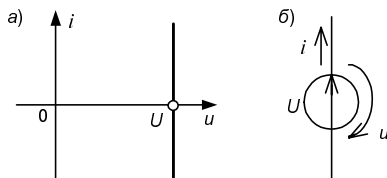


Рис. 2.30

Композиция из двух названных элементов показана на рис. 2.31. Найдем ее ВАХ. Эта задача отличается от только что рассмотренной лишь видом характеристик элементов.

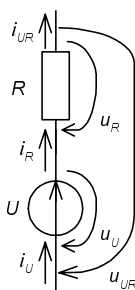


Рис. 2.31

Решение показано на рис. 2.32.

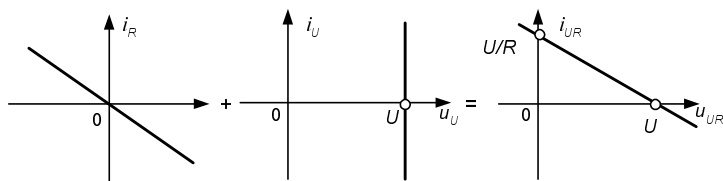


Рис. 2.32

Если надо найти ВАХ двухполюсника, составленного из двух двухполюсников, соединенных параллельно, поступают аналогично — складывают значения токов при одинаковых значениях напряжений.

9.5. Метод малого сигнала

В аналоговой электронике переменное электрическое поле обычно воздействует на вход транзистора не само по себе, а "на фоне" постоянного электрического поля. В связи с этим принято рассматривать напряжение $u(t)$ воздействующего периодически изменяющегося поля в виде суммы **постоянной** U и **переменной** $\tilde{u}$ составляющих (рис. 2.33).

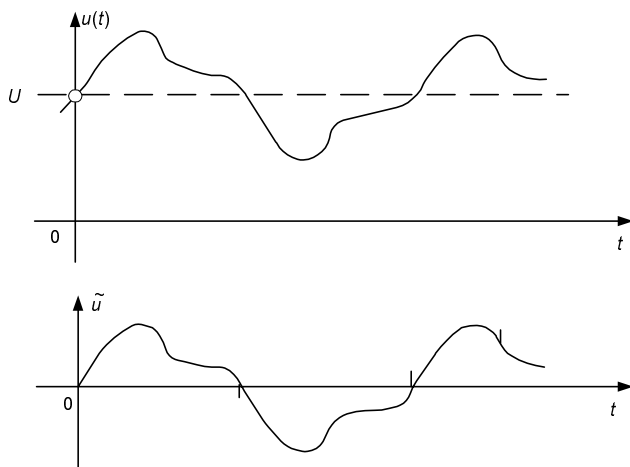


Рис. 2.33

Переменной называют составляющую, интеграл которой за период равен нулю:

$$\int_{\sigma}^T \tilde{u} dt = 0.$$

Как правило, амплитуда U_m переменной составляющей много меньше, чем U . Рассмотрим простейшую задачу с таким воздействием (рис. 2.34, а). Напряжение $u_{ис}$ источника сигнала складывается из двух:

$$u_{ис} = U + \tilde{u},$$

причем $U_m \ll U$. Характеристика двухполюсника N показана на рис. 2.34, б.

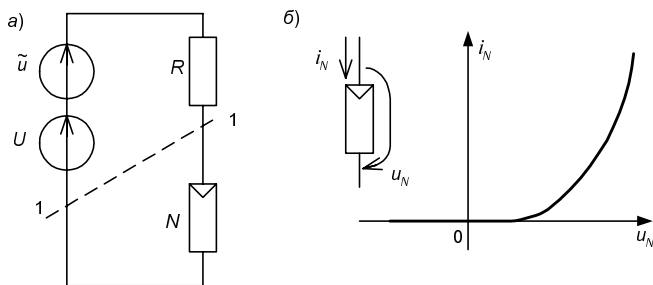


Рис. 2.34

Разделив схему на два двухполюсника по линии 1—1, мы получим знакомую конфигурацию. Осмыслим, как движется изображающая точка по характеристике двухполюсника N . С этой целью решим графически задачу для трех моментов времени — когда: $\tilde{u} = 0$ (рис. 2.35, а); $\tilde{u} = U_m$ (рис. 2.35, б); $\tilde{u} = -U_m$ (рис. 2.35, в).

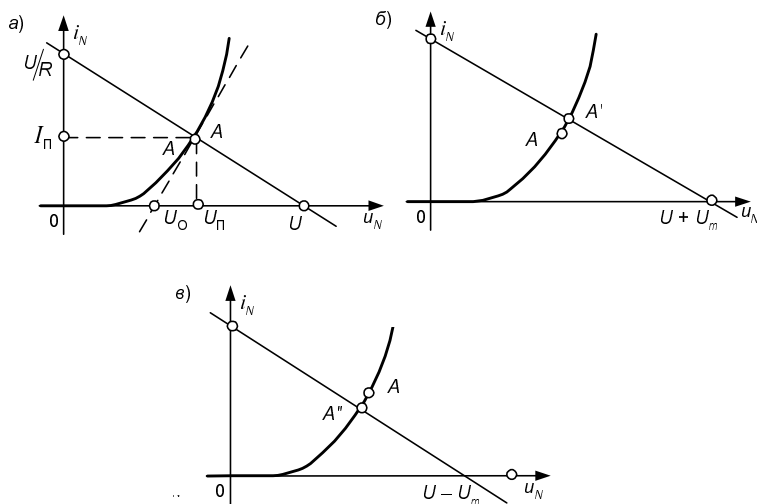


Рис. 2.35

Очевидно, изображающая точка колеблется относительно точки A в пределах отрезка $A'A''$. Этот отрезок хотя и криволинеен, но несильно отличается

от отрезка прямой. Поэтому для окрестностей точки A мы можем заменить кривую касательной к ней (штриховая линия на рис. 2.35, a). Осмыслим, какому двухполюснику она соответствует. Напишем уравнение касательной:

$$u_K = u_0 + r_A i_K, \quad (9.9)$$

где $r_A = \left. \frac{du_N}{di_N} \right|$ в точке A — параметр, именуемый **дифференциальным сопротивлением**.

По уравнению (9.9) можно составить схему, служащую линейной мысленной моделью двухполюсника N . Рассуждать следует так. Поскольку в уравнении (9.9) связаны напряжения, это — второй закон Кирхгофа.

Напишем его в общем виде:

$$u_K = u_1 + u_2, \quad (9.10)$$

где

$$u_1 = u_0; \quad (9.11)$$

$$u_2 = r_A i_K. \quad (9.12)$$

Уравнению (9.10) соответствует схема, показанная на рис. 2.36, a . Рассматривая формулы (9.11) и (9.12), увидим, что первый элемент — источник напряжения u_0 (поскольку напряжение не зависит от силы тока), а второй — резистивный элемент r_A (рис. 2.36, b).

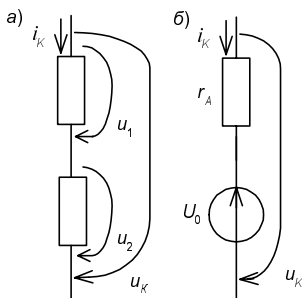


Рис. 2.36

В схеме на рис. 2.34, a заменим элемент N его линейной аппроксимацией, представленной на рис. 2.36, b (рис. 2.37).

Теперь перед нами стоит линейная задача, и мы можем решить ее как в школе:

$$i = \frac{U + \mathcal{U} - U_0}{R + r_A}.$$

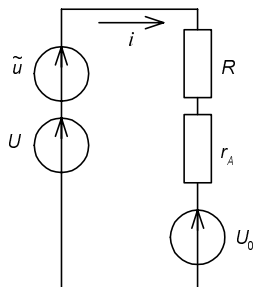


Рис. 2.37

Разделим постоянную и переменную составляющие:

$$i = I_{\Pi} + \tilde{i},$$

где

$$I_{\Pi} = \frac{U - U_0}{R + r_A};$$

$$\tilde{i} = \frac{\tilde{u}}{R + r_A}. \quad (9.13)$$

Постоянную составляющую мы уже нашли графически (см. рис. 2.35, а).

Переменную составляющую получим аналитически, воспользовавшись формулой (9.13).

Теперь займемся очень важным обобщением. Начертим схему, соответствующую формуле (9.13). Она показана на рис. 2.38. Чем эта схема отличается от предыдущей? Отсутствием источников постоянного напряжения — они заменены закоротками (то есть отрезками проводов).

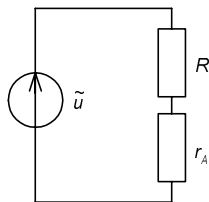


Рис. 2.38

Сколько бы мы ни решали подобных задач, мы всегда приходим к такому результату. Основываясь на этом, можно сформулировать правила применения метода малого сигнала.

1. Полагаем $\tilde{u} = 0$ и графическим методом находим:

- Постоянные составляющие (например, U_{Π} и I_{Π} , как на рис. 2.35, а).

- Значения (одного или нескольких — в зависимости от характера задачи) дифференциальных (малосигнальных) параметров (в примере

$$r_A = \left. \frac{du_N}{di_N} \right| \text{ в точке } A.$$

2. Заменяем нелинейный элемент его линейной моделью.
3. Полагаем все постоянные напряжения равными нулю, т. е. заменяем все источники постоянных напряжений короткими (забегая несколько вперед, добавим, что источники постоянных токов одновременно заменяют разрывами).
4. Аналитически решаем линейную задачу.

Следует подчеркнуть, что этот алгоритм пригоден для сколь угодно сложных схем.

9.6. Схемы замещения.

Идеальные двухполюсники

Вспомним, что первым шагом любого теоретического исследования является выработка мысленной модели объекта. Смысл этой процедуры состоит в том, чтобы учесть все факторы, оказывающие **существенное** влияние на ход процесса, и сконструировать строго определенную идеальную систему.

В теории электрических цепей такой системой служит **схема замещения**.

Замечание

В литературе схемы замещения обычно называют "эквивалентными схемами". Это неудачно, т. к. термин *эквивалентный* — синоним слова *равносильный*. Но сама цепь и ее схема замещения отнюдь не равносильны. Эквивалентными (друг другу) схемами разумно называть схемы замещения, имеющие одинаковое поведение при разной конфигурации и компонентном составе.

Ее строят из идеальных (абстрактных) элементов, большей частью служащих простейшими мысленными моделями реальных элементов.

Слово *идеальный* используют в двух значениях: в первом — мысленный (воображаемый, абстрактный, нереальный, предмет из мира идей) и во втором — наилучший, "чистый". В рассматриваемом термине мы используем его в первом значении. Вместе с тем в какой-то мере подходит и второе. Дело в том, что в каждом элементе электрической цепи происходят разные процессы: имеются и электрическое, и магнитное поле, и диссипация — превращение электромагнитного движения в движение иной формы (например, тепловое). Однако реальные элементы конструируют и используют так, чтобы преобладало что-нибудь одно. Резистор применяют так, чтобы преобладала диссипация, а электрическим и магнитным полем можно было пренебречь. В конденсаторе должны происходить процессы, связанные пре-

имущественно с электрическим полем, а в индуктивной катушке — с магнитным. Идеальные элементы "сконструированы" так, что в них "происходит" только один процесс, т. е. это — "чистые" элементы.

Теория электрических цепей — развитая наука. В ней сформирован такой набор идеальных элементов, что необходимость введения нового идеального элемента возникает очень редко. Вместе с тем всегда следует помнить, что любая, сколь угодно сложная мысленная модель — относительная истина, и поэтому, пользуясь ею, можно прийти к неверному решению. Искусство правильного применения мысленных моделей вырабатывается только в процессе приобретения опыта, проверяемого в практической предметной деятельности.

С некоторыми идеальными элементами мы уже знакомы. Это **источник напряжения** — одна из двух простейших моделей источника питания, **резистивный элемент** — простейшая модель резистора, **емкостный элемент** — простейшая модель конденсатора, и **индуктивный элемент** — модель индуктивной катушки. Познакомимся с другими.

Обратимся к характеристике фотогенератора (см. рис. 2.19). К идее об источнике напряжения можно прийти, заменив ее крутую ветвь вертикальной прямой. Аналогично, заменив пологую ветвь горизонтальной прямой, мы получим характеристику еще одного идеального элемента — **источника тока**. Его ВАХ и условное графическое обозначение показаны на рис. 2.39.

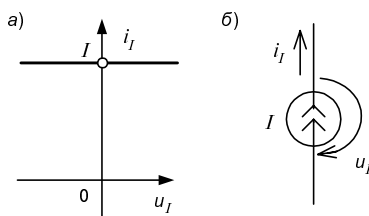


Рис. 2.39

Идеальными элементами являются также **разрыв** — двухполюсник, ток которого равен нулю при любом напряжении, и **закоротка** (напряжение равно нулю при любом токе). Их характеристики показаны на рис. 2.40. Разрыв можно рассматривать как источник тока, сила тока которого равна нулю, а закоротку — как источник напряжения, напряжение которого равно нулю.

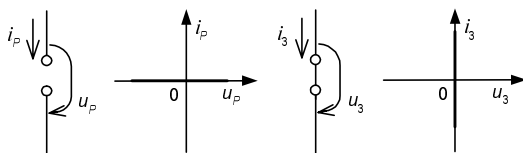


Рис. 2.40

Введем также понятие **идеального ключа** (рис. 2.41), наделив его способностью мгновенно переходить из одного состояния в другое.

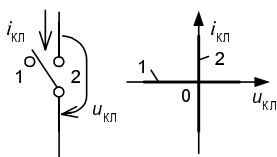


Рис. 2.41

Идеальным вентилем назовем абстрактный двухполюсник, характеристика которого получается как простейшая (прямоугольная) кусочно-линейная аппроксимация ВАХ диода (рис. 2.42).

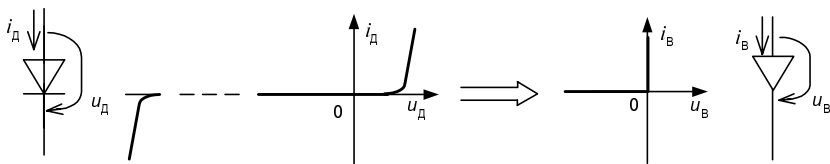


Рис. 2.42

Кроме прототипных, используют беспрототипные (парадоксальные) идеальные элементы. Они отличаются также тем, что каждый в отдельности лишен физического смысла, но в совокупности с другими элементами не лишен такового. Простейшим из них является **элемент отрицательной резистивности**, поведение которого при согласном отсчете напряжения и тока описывается законом Ома $u = \Re i$, но при $\Re < 0$. Этот элемент необходим, чтобы моделировать поведение негатронов для тех отрезков времени, когда изображающая точка движется по падающему участку характеристики. Все сведения о названных идеальных элементах объединены в табл. 2.1.

Обратим внимание на важное обстоятельство. Мы ввели идеальные элементы, опираясь на поведение реальных элементов. Однако используют их не только для замещения прототипов, но и в других случаях.

Так, резистивный элемент применяют в качестве элемента схемы замещения всех тех реальных элементов, поведение которых описывают вольт-амперной характеристикой при условии, что по соображениям точности анализа допустима ее кусочно-линейная аппроксимация на каком-либо участке. Другим признаком необходимости включения резистивного элемента в схему замещения (разумеется, связанным с первым) является диссипация (потери) энергии в каком-либо реальном элементе цепи (см. п. 6.3).

Таблица 2.1

Реальный элемент (прототип)			Идеальный элемент			
Название	УГО	Компонентный закон (характеристика)	Название	УГО	Компонентный закон	
					в графической форме	в аналитической форме
Источник питания (пример — фотогенератор)			Источник тока			$i = I$ при любом напряжении
			Источник напряжения			$u = U$ при любом токе
Разрыв цепи		$i \approx 0$ при любом напряжении	Разрыв			$i = 0$ при любом напряжении
Короткое замыкание		$u \approx 0$ при любом токе	Закоротка			$u = 0$ при любом токе
Резистор		$u \approx Ri$ $i \approx Gu$ $G = 1/R$	Резистивный элемент			$u = Ri$ $i = Gu$ $G = 1/R$
Конденсатор		$q \approx Cu$	Емкостный элемент			$q = Cu$ ($q \int u dt$)
Индуктивная катушка		$\sigma \approx Li$	Индуктивный элемент			$\sigma = Li$ ($\sigma \int u dt$)
Диод			Идеальный вентиль			$i = 0$ при $u < 0$ $u = 0$ при $i > 0$

Таблица 2.1 (окончание)

Реальный элемент (прототип)			Идеальный элемент			
Название	УГО	Компонентный закон (характеристика)	Название	УГО	Компонентный закон	
					в графической форме	в аналитической форме
Выключатель (контакты реле)		$i \approx 0$, если разомкнут $u \approx 0$, если замкнут	Идеальный ключ			$i = 0$, если разомкнут $u = 0$, если замкнут
Негатрон (пример — туннельный диод)		На участке АВ $\frac{du}{di} < 0$ — дифференциальное сопротивление отрицательно	Элемент отрицательной резистивности			$u = R i^*$ $R < 0$ — дифференциальное сопротивление отрицательно
					*Можно использовать только в пределах участка АВ	

Емкостный элемент вводят во всех тех случаях, когда необходимо учесть влияние электрического поля, а индуктивный — магнитного поля.

Идеальный ключ вводят для замещения промежутка "коллектор—эмиттер" транзистора, работающего в режиме переключения (см. п. 9.3, 10.1, 11.3, § 16).

Источники напряжения и тока, а также идеальный вентиль используют при построении схем замещения существенно нелинейных диссипативных двухполюсников на основе кусочно-линейной аппроксимации их характеристик (см. п. 9.7).

Еще с двумя беспрототипными элементами — зависимыми источниками напряжения и тока — мы познакомимся, изучая транзистор.

9.7. Кусочно-линейная аппроксимация характеристик и схемы замещения нелинейных двухполюсников

С одной кусочно-линейной аппроксимацией мы уже познакомились (см. рис. 2.42). Используя ее, можно строить другие кусочно-линейные аппроксимации. Для этого надо включить в работу "пространственное воображение".

Займемся более точными, чем характеристика вентиля, аппроксимациями ВАХ диода. Одна из них показана на рис. 2.43.

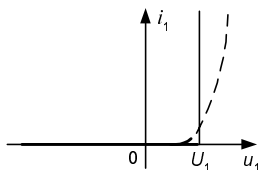


Рис. 2.43

Возможно ли получить ее из характеристики вентиля? Да: для этого ее надо сдвинуть вправо по оси абсцисс. Но что такое сдвиг кривой вдоль оси абсцисс? Это — прибавление константы ко всем абсциссам данной кривой (рис. 2.44):

$$u_1 = u_B + u_{U1}.$$

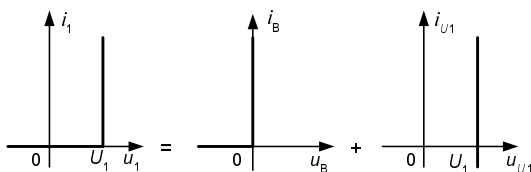


Рис. 2.44

Прямая, параллельная оси тока — ВАХ источника напряжения. Сложение напряжений соответствует последовательному соединению двухполюсников. Следовательно, двухполюсник с характеристикой, приведенной на рис. 2.43, состоит из последовательно соединенных идеального вентиля и источника напряжения (рис. 2.45).

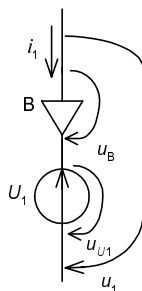


Рис. 2.45

Перейдем к следующей аппроксимации (рис. 2.46).

Нетрудно сообразить, что теперь к абсциссам предыдущей ВАХ надо прибавить абсциссы наклонной прямой (рис. 2.47).

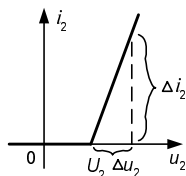


Рис. 2.46

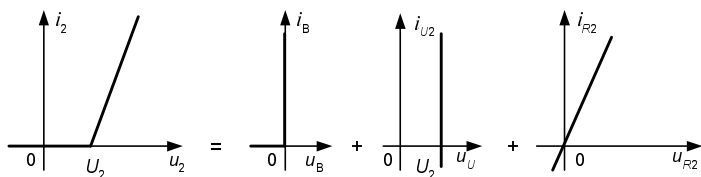


Рис. 2.47

Наклонная прямая — не что иное, как характеристика резистивного элемента. Следовательно, искомая схема замещения получится, если к предыдущей последовательно подключить резистивный элемент (рис. 2.48). Значение R_2 найдем, обратясь к исходной характеристике (см. рис. 2.46):

$$R_2 = \frac{\Delta u_2}{\Delta i_2}.$$

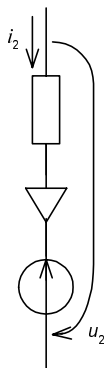


Рис. 2.48

Естественно, возникает вопрос: какую аппроксимацию следует применять в каждом конкретном случае. На него можно ответить, только рассмотрев конкретные количественные отношения. Возьмем простейшую схему, показанную на рис. 2.49. ВАХ реальных кремниевых диодов таковы, что в рабочем диапазоне токов напряжение на диоде составляет $0,7 \pm 0,1$ В. Если в

схеме на рис. 2.49 $U = 100$ В, то напряжением на диоде можно пренебречь, заменив его идеальным вентилем. Погрешность вычислений при этом окажется меньше 1%. Вторая аппроксимация (см. рис. 2.43) приведет к погрешности не более 1% при $U \geq 10$ В. Третья аппроксимация (см. рис. 2.46) подойдет при $U \geq 1$ В.

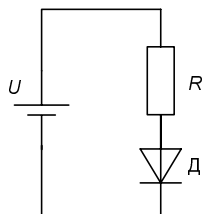


Рис. 2.49

Характеристика диода "отклоняется к оси тока" (см. рис. 2.20, *в* и комментарий к нему). Как быть с характеристикой, "отклоняющейся к оси напряжения" (рис. 2.50, *а*)? Проще всего заменить ее прямым углом, стороны которого совпадают с полуосями (рис. 2.50, *б*). Надо ли для этого ввести новый абстрактный элемент? Нет. Можно воспользоваться идеальным вентилем, если должным образом изменить направления отсчета. Сравним ВАХ на рис. 2.50, *б* и рис. 2.42, увидим, что $u_1 = -u_D$, $i_1 = -i_D$. Следовательно, чтобы получилась ВАХ, показанная на рис. 2.50, *б*, напряжение u_1 и силу тока i_1 надо отсчитывать так, как показано на рис. 2.50, *в*.

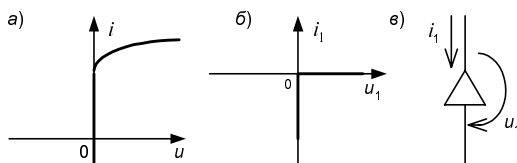


Рис. 2.50

Чтобы получить характеристику, показанную на рис. 2.51, *а* надо к вентилю параллельно присоединить источник постоянного тока (рис. 2.51, *б*).

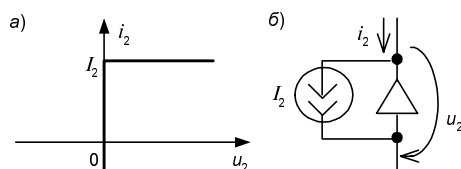


Рис. 2.51

Наконец, для получения ВАХ, представленной на рис. 2.52, *а*, надо параллельно добавить резистивный элемент (рис. 2.52, *б*).

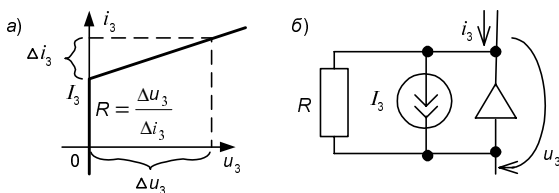


Рис. 2.52

Если необходима более точная аппроксимация — например, как на рис. 2.53, *а* — ее можно представить как сумму ординат характеристик, показанных на рис. 2.53, *б*, чему соответствует схема на рис. 2.53, *в*, причем

$$R_1 = \frac{U_2 - U_1}{\Delta i_1}; \quad R_2 = \frac{R_1 R_3}{R_1 - R_3},$$

где $R_3 = \frac{\Delta u_2}{\Delta i_2}$ (см. рис. 2.53, *а*).

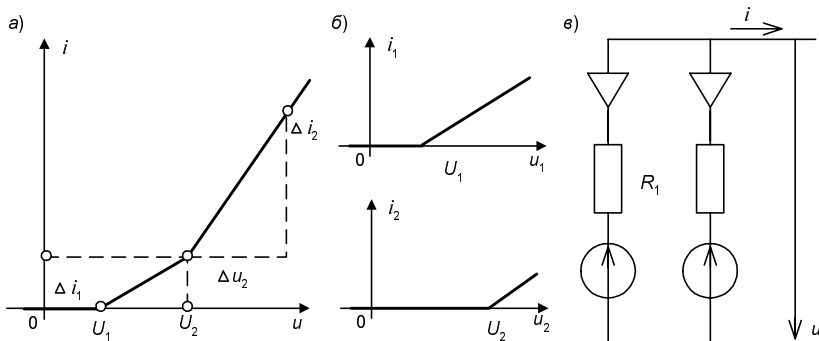


Рис. 2.53

9.8. Структурирование и эквивалентные преобразования схем

Применив структурные и компонентные законы к схеме электрической цепи, можно найти все токи и напряжения. Однако, как правило, это не нужно.

Любая электрическая цепь имеет естественную структуру — она состоит из источников питания и сигнала, приемников и т. п. Каждый из этих элементов, в свою очередь, может состоять из отдельных компонентов — резисто-

ров, конденсаторов, транзисторов и т. д. Например, химический источник питания обычно состоит из нескольких элементов. Сетевой источник питания — довольно сложная система, содержащая трансформатор, диоды, транзисторы и другие элементы. Однако внутренним строением источника питания интересуются только тогда, когда его проектируют, производят или ремонтируют. Во всех остальных случаях, т. е. при использовании, источник питания рассматривают как целое — двухполюсник, поведение которого описывается определенной характеристикой. Аналогично в зависимости от того, какую именно проблему мы обсуждаем, мы можем **структурировать** схему цепи так, чтобы не отвлекать внимания на второстепенные (в пределах данной проблемы) детали. Например, когда мы обсуждаем тему "общий вывод транзистора", для нас несущественно, включены ли какие-либо вспомогательные элементы между выходом источника сигнала и промежуток "база—эмиттер", т. е. входом, транзистора. Поэтому мы можем ввести понятие 'входной двухполюсник', включив в него и источник сигнала, и вспомогательные элементы. **При анализе транзисторных цепей подобным образом поступают систематически.** Обычно никто не исследует и не рассчитывает цепь в полном объеме, учитывая сразу все естественные элементы, в нее входящие. Задачу решают по частям: структурируют схему каким-то способом, обеспечивающим наибольшее сокращение трудоемкости, находят характеристики фрагментов ("составных элементов"), а потом решают задачу с этими элементами.

При структурировании применяют эквивалентные преобразования схем. Эквивалентными (друг другу) называют схемы замещения, имеющие одинаковое поведение при разной структуре и компонентном составе. Известны некоторые типичные преобразования, которые следует запомнить. Все преобразования основаны на применении законов Кирхгофа, т. к. без этого не может быть решена ни одна задача о цепях. **Их можно рассматривать как теоремы.** Большинство распространенных преобразований очень несложны, ими легко овладеть. Рассмотрим наиболее массовые.

1. **Перемена мест компонентов в пределах ветви или кисти.** В любой момент времени токи в выводах всех компонентов ветви равны друг другу. Аналогично в любой момент времени равны друг другу и напряжения между выводами всех компонентов кисти. Поэтому как в пределах ветви, так и внутри кисти двухполюсники можно менять местами.
2. **Эквивалентность одному двухполюснику фрагмента, содержащего несколько двухполюсников.** Любую ветвь, состоящую из произвольного числа двухполюсников, поведение которых описывается вольт-амперными характеристиками, можно заменить одним двухполюсником. ВАХ последнего находят по точкам, складывая значения напряжений компонентов, соответствующих нескольким значениям тока. Аналогично любую кисть можно заменить одним двухполюсником, ВАХ которого тоже находят по точкам, складывая значения токов при одинаковых значениях напряжений.

Справедлива и обратная теорема: любой двухполюсник можно заменить ветвью или кистью, состоящими из произвольного числа двухполюсников.

Из школьного курса физики вы знаете, что ветвь, составленная из n резистивных элементов, эквивалентна одному резистивному элементу (рис. 2.54, а) при условии, что сопротивления связаны выражением

$$R_{\Sigma} = \sum_{l=1}^n R_l.$$

Аналогично кисть из n резистивных элементов эквивалентна

одному резистивному элементу, (рис. 2.54, б), если $G_{\Sigma} = \sum_{l=1}^n G_l$, где

$G_l = 1/R_l$ — проводимость резистивного элемента. Эти теоремы являются частными случаями сформулированных выше, справедливыми, когда допустима линейная аппроксимация ВАХ всех компонентов.

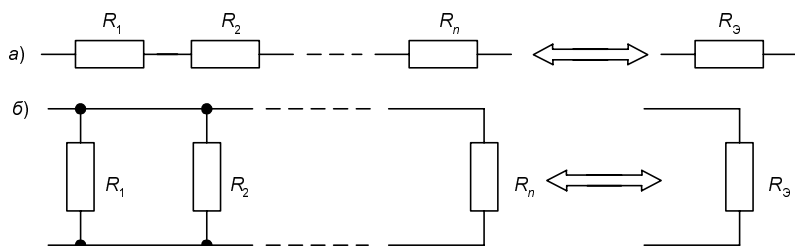


Рис. 2.54

Обобщая, можно сказать, что любой двухполюсник, составленный из резистивных элементов, эквивалентен одному резистивному элементу.

Аналогичные утверждения справедливы для индуктивных и емкостных элементов.

3. **"Поглощение" элемента источником.** Благодаря специфическому виду ВАХ источника напряжения (напряжение между его выводами не зависит от силы тока) источник напряжения "поглощает" другие двухполюсники, подключенные к нему параллельно. Иными словами, он **доминирует** над ними (рис. 2.55, а). Аналогично источник тока доминирует над двухполюсниками, соединенными с ним последовательно (рис. 2.55, б).

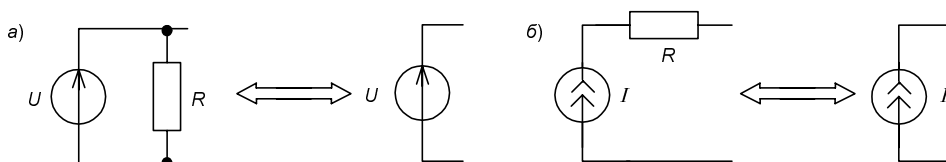


Рис. 2.55

4. **"Размножение" источника напряжения.** В силу той же особенности его ВАХ источник напряжения можно "размножить" в произвольном количестве экземпляров, а также "сливать" (рис. 2.56). Иногда эту операцию целесообразно трактовать как "перенос источника напряжения через узел" (в более общем случае — перенос через многополюсник).

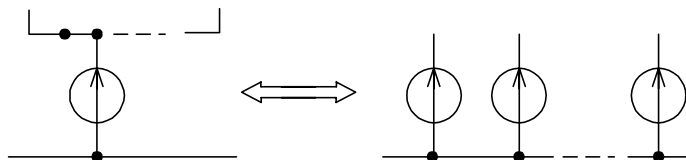


Рис. 2.56

5. **"Размножение" источника тока.** Источник тока, соединенный с концами ветви, состоящей из нескольких двухполюсников, можно превратить в несколько таких же источников тока, присоединенных к каждому или нескольким двухполюсникам ветви (рис. 2.57).

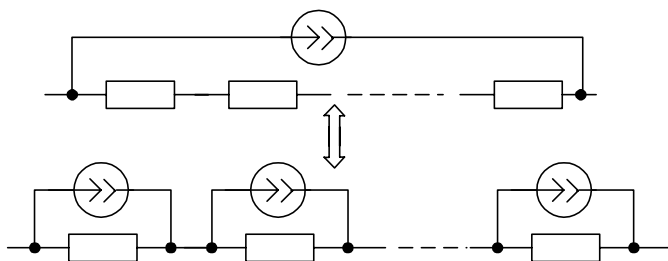


Рис. 2.57

6. **Эквивалентность последовательной и параллельной схем замещения источников питания.** Вспомним вид типичной ВАХ источника питания (см. рис. 2.24). При встречном отсчете тока и напряжения она расположена в первом квадранте. Допустим, применима ее линейная аппроксимация (рис. 2.58, *а*). Уменьшим масштаб по оси тока и продолжим характеристику влево (рис. 2.58, *б*). Напишем уравнение прямой:

$$u = U - R_i i.$$

Рассуждая подобно тому, как мы рассуждали при построении схемы на рис. 2.36, *б*, мы придем к схеме, показанной на рис. 2.59.

Однако можно написать другое уравнение прямой:

$$i = I - Gu; \quad G = 1/R.$$

Это — первое уравнение Кирхгофа. Сложению токов соответствует параллельное соединение двухполюсников. Нетрудно догадаться, что один из них — источник тока, а второй — резистивный элемент (рис. 2.60).

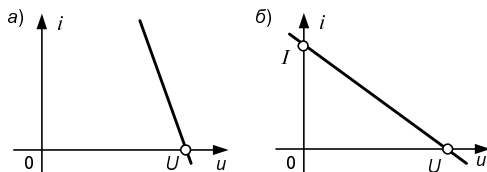


Рис. 2.58

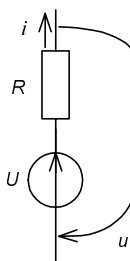


Рис. 2.59

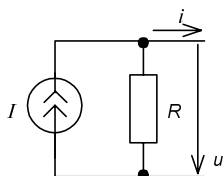


Рис. 2.60

Поскольку схемы на рис. 2.59 и рис. 2.60 соответствуют одной вольт-амперной характеристике (см. рис. 2.58, б), они эквивалентны друг другу при условии, что $U = RI$ (или $I = GU$).

7. **Теорема Тевенина—Нортона.** Довольно часто встречается такая ситуация, когда в схеме замещения удастся выделить один или несколько двухполюсников, каждый из которых содержит только резистивные элементы, источники напряжения и источники тока, т. е. элементы, ВАХ которых — прямые линии (рис. 2.61). Зная параметры всех элементов, мы можем найти характеристику такого двухполюсника, а значит — и его схему. Подумаем, как она должна выглядеть.

Уже многократно подчеркивалось, что любая задача об электрических цепях решается с применением уравнений Кирхгофа. Это — **линейные** соотношения (токи и напряжения входят в них в первых степенях). ВАХ элементов (по условию) — тоже прямые линии. Как бы мы ни складывали прямые, ничего, кроме прямой, получиться не может. Поэтому при

встречном отсчете напряжения и тока искомая ВАХ может выглядеть только так, как показано на рис. 2.62. Иными словами, она имеет уже знакомый нам по предыдущей теореме вид (см. рис. 2.58, б). Отсюда следует, что ей соответствует любая из двух эквивалентных друг другу схем, показанных на рис. 2.59 и рис. 2.60.

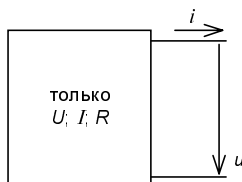


Рис. 2.61

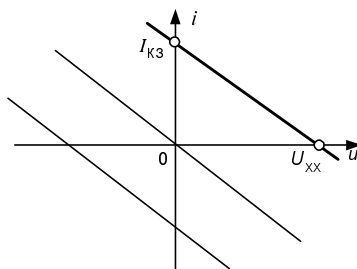


Рис. 2.62

Естественно, необходимо уметь находить параметры эквивалентных двухполюсников U , I , R . Проще всего это сделать, ориентируясь на точки пересечения характеристики с осями (см. рис. 2.62) путем мысленных экспериментов, называемых "опыт холостого хода" (хх) и "опыт короткого замыкания" (кз). В самом деле,

$$U = U_{\text{хх}} = u \Big|_{i=0} ;$$

$$I = I_{\text{кз}} = i \Big|_{u=0} ;$$

$$R = U_{\text{хх}} / I_{\text{кз}} .$$

Если в преобразуемой схеме нет независимых источников, R можно найти другим способом, положить равными нулю все напряжения и все токи источников в изучаемом двухполюснике и вычислить сопротивление его между выводами.

Теорема Тевенина—Нортона очень удобна. Убедимся в этом на примере уже решенной задачи (см. рис. 2.18).

1. Отделим элемент R_3 , от остальной части схемы.

2. Для последней найдем напряжение холостого хода (рис. 2.63, а).

$$U_{xx} = u_2 \text{ / при } i_3 = 0 = R_2 i_2$$

$$i_2 = i_1 \text{ (так как } i_3 = 0 \text{)}$$

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1}$$

$$u_1 = u_U - u_2$$

$$\mid u_U = U$$

$$u_1 = U - u_2$$

$$i_2 = \frac{U - u_2}{R_1}$$

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1} (U - u_2)$$

$$(R_1 + R_2) u_2 = R_2 U$$

$$U_{xx} = u_2 = \frac{R_2 U}{R_1 + R_2}. \quad (9.14)$$

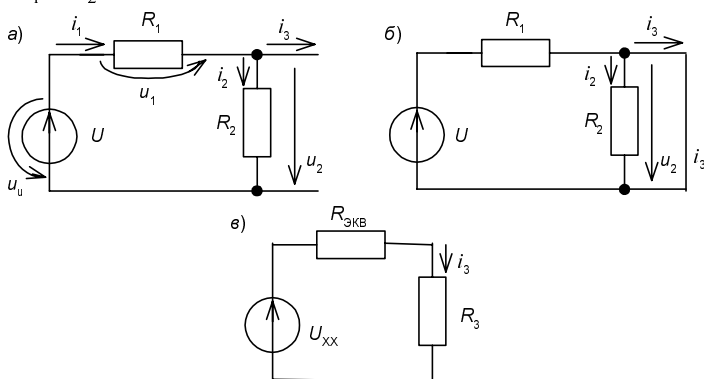


Рис. 2.63

3. Найдем ток короткого замыкания (рис. 2.63, б):

$$I_{кз} = i_3 \mid \text{при } u_2 = 0 = \frac{U}{R_1}. \quad (9.15)$$

4. Найдем $R_{эКВ}$:

$$R_{эКВ} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9.16)$$

5. В результате имеем задачу из школьного курса (рис. 2.63, в):

$$i_3 = \frac{U_{xx}}{R_{эКВ} + R_3} = \frac{R_2 U}{R_1 R_2 + (R_1 + R_2) R_3}.$$

Трехполюсник, состоящий резисторов R_1 и R_2 , соединенный с источником напряжения как показано на рис. 2.63, *а*, называют **делителем напряжения**. В транзисторных цепях этот фрагмент встречается очень часто. Поэтому полезно запомнить формулы (9.14)—(9.16), чтобы каждый раз не выводить их.

8. **Теорема Миллмана.** При анализе электронных цепей встречается схема, представляющая собой кисть, состоящую из однотипных ветвей, каждая из которых содержит источник напряжения и резистивный элемент, соединенные последовательно (рис. 2.64, *а*). Очевидно, к ней применима теорема Тевенина—Нортона. Параметры эквивалентной схемы в этом случае находят очень просто. Заменяем последовательные схемы в ветвях параллельными (рис. 2.64, *б*). Поменяем местами элементы, сгруппировав вместе источники тока и отдельно — резистивные элементы. Тогда очевидно, получим схему, показанную на рис. 2.64, *в*, где

$$I_{\Sigma} = \sum I_i;$$

$$G_{\Sigma} = \sum G_i.$$

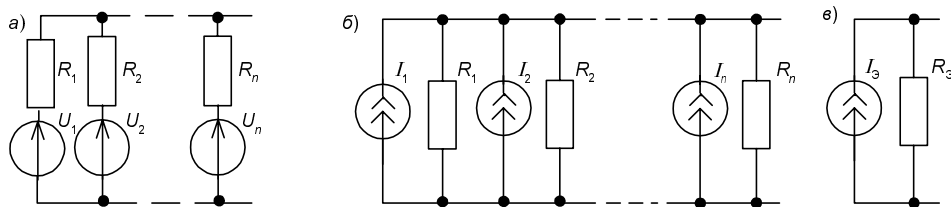


Рис. 2.64

9.9. Принцип (метод) суперпозиции (наложения)

Метод позволяет ускорить вычисления. Основан на идее, состоящей в том, что **в случае применения линейной модели объекта** аддитивность (суммируемость) причин вызывает аддитивность следствий. Одно из его применений известно вам из курса школьной физики в виде принципа независимости действия сил.

Применительно к электрической цепи он означает, что любое напряжение или силу тока **для линейной схемы замещения** можно вычислить как алгебраическую сумму "частных" решений, каждое из которых находят как результат действия только одного источника (остальные источники напряжений при этом заменяют коротками, а источники тока — разрывами).

Рассмотрим простейший пример. Схема показана на рис. 2.65, *а*. Необходимо найти выражение для тока i_2 .

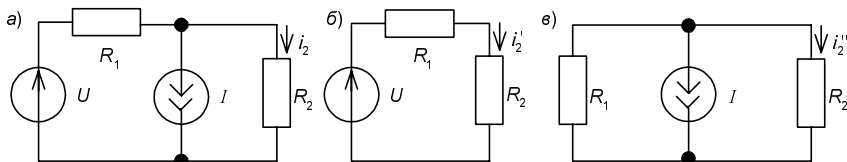


Рис. 2.65

1. Удаляем источник тока (рис. 2.65, б):

$$i_2' = U / (R_1 + R_2).$$

2. Заменяем закороткой источник напряжения (рис. 2.65, в):

$$i_2'' = -G_2 I / (G_1 + G_2) = -R_1 I / (R_1 + R_2).$$

Окончательно получаем:

$$i_2 = i_2' + i_2'' = (U - R_1 I) / (R_1 + R_2).$$

§ 10. Переходные процессы

10.1. Общие сведения

Переходный процесс — разновидность динамического режима (см. п. 6.3). Сущность переходного процесса состоит в изменении связанных с электрической цепью электрического и магнитного полей. Происходит оно в разных формах. Во-первых, в цепи используют специальные элементы — конденсаторы и индуктивные катушки, — предназначенные для концентрации (локализации) электрического и магнитного полей в небольшом объеме. Во-вторых, даже если их нет, в цепи всегда присутствуют поля вокруг проводов и других токоведущих элементов и между ними. В обоих случаях для учета влияния полей в схему замещения вводят емкостные и индуктивные элементы — мысленные модели накопителей.

Количественно состояние накопителей оценивают их энергией или однозначно с ней связанными величинами — напряжением емкостных элементов и током индуктивных. Иногда вместо напряжения и тока используют заряд конденсатора и вольт-секундную площадь катушки, также однозначно связанные с энергией.

Переходные процессы возникают в цепи при работе транзистора в режиме переключения (см. п. 9.3). В этих случаях промежуток коллектор-эмиттер целесообразно замещать идеальным ключом. Поэтому используемые в последующих примерах ключи следует рассматривать как идеальные элементы, заменяющие транзисторы в тех случаях, когда временем их переключения можно пренебречь по сравнению с постоянными времени, обусловленными другими элементами цепи.

10.2. Схемы замещения с одним накопителем

Такие схемы очень часто используют при первоначальном анализе.

Рассмотрим простейший пример переходного процесса (рис. 2.66). Вначале ключ замкнут. Момент его размыкания обозначим через $t = 0$. Необходимо выразить ток и напряжение емкостного элемента как функции времени.

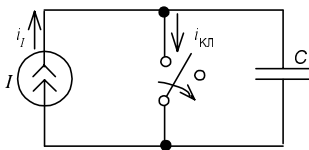


Рис. 2.66

Изучим разные этапы и события.

1. $t < 0$. Прежде всего, надо выявить и найти начальные условия, т. е. рассмотреть состояние при $t < 0$. В схеме один накопитель — емкостный элемент. Следовательно, одна переменная состояния — U_C . Ее значение в момент $t = -0$ — начальное условие. Рассуждаем дальше. Параллельно соединены три элемента, один из которых — замкнутый ключ. Вспомним свойства элементов. Напряжение на замкнутом ключе при любом токе равно нулю (и иным быть не может). Согласно второму закону Кирхгофа в параллельной схеме все напряжения равны. Следовательно, ключ доминирует над остальными элементами, "навязывая" им свое напряжение. Поэтому начальное условие — нулевое: $u_C(-0) = 0$. Ток источника замыкается через ключ.
2. $t = +0$. Очень важно сориентироваться в состоянии непосредственно после размыкания ключа. В рассматриваемой задаче ключ размыкается, т. е. его ток становится равным нулю. Поэтому ключ целесообразно удалить из схемы, перечертив ее заново (рис. 2.67).

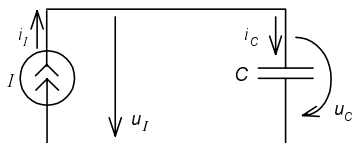


Рис. 2.67

Чтобы написать структурные и компонентные законы, обозначим все направления отсчета. Как это лучше сделать? В принципе, совершенно безразлично. Однако существует **простейшее практическое правило, состоящее в том, что чем меньше в формулах отрицательных знаков, тем меньше вероятность ошибиться**. Направление действия источника тока задано.

Поэтому если мы выберем направление отсчета его тока i_I как показано на рис. 2.67, получим

$$i_I = I \quad (10.1)$$

(это, кстати сказать, компонентный закон для источника тока). Если отсчет i_C направить сверху вниз (рис. 2.67), первый закон Кирхгофа запишется тоже без минусов:

$$i_I = i_C. \quad (10.2)$$

При согласном отсчете напряжения и тока в компонентном законе для емкостного элемента тоже нет минуса:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}. \quad (10.3)$$

Следовательно, целесообразно отсчет u_C направить сверху вниз. Наконец, направив сверху вниз отсчет u_I , получим второй закон Кирхгофа:

$$u_I = u_C. \quad (10.4)$$

Теперь у нас есть все исходные данные для анализа: два компонентных закона (10.1) и (10.3) и два структурных — (10.2) и 10.4).

Согласно (10.1) и (10.2) ток емкостного элемента находим сразу:

$$i_C = I. \quad (10.5)$$

Подставив его в формулу (10.3), получим производную напряжения:

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{I}{C}. \quad (10.6)$$

3. $t > 0$. Ток емкостного элемента сохраняется равным I . Напряжение растет с постоянной скоростью:

$$u_C = \int \frac{I}{C} dt = \frac{It}{C}. \quad (10.7)$$

Чертим временные диаграммы (на них надо обязательно показывать предысторию, т. е. те зависимости переменных от времени, которые были при $t < 0$). Временные диаграммы, относящиеся к одному процессу, следует чертить "столбиком" — так, чтобы одинаковые моменты времени располагались на одной вертикали — тогда их легко читать. Для более глубокого понимания процессов полезно представлять не только искомые переменные, но и другие (в данном случае — токи источника и ключа) (рис. 2.68).

При решении более сложных задач очень помогает сориентироваться в происходящем еще один подход — слежение за движением точки, изображающей состояние накопителя, по характеристике ненакапливающего двухполюсника. Чтобы начать привыкать к нему, применим его и в данном примере.

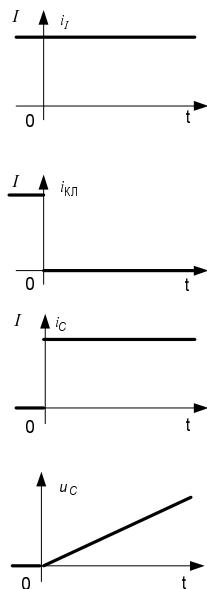


Рис. 2.68

ВАХ источника тока показана на рис. 2.69. Точка, изображающая состояние емкостного элемента, при $t < 0$ находится в начале координат ($u_C = 0$; $i_C = 0$). В момент $t = 0$ она "скачет" вверх (см. рис. 2.69). Основания для данного утверждения следующие. Напряжение емкостного элемента пропорционально **интегралу** силы тока по времени. Следовательно, для его изменения требуется время. Иными словами, за ничтожно малый промежуток времени напряжение емкостного элемента измениться не может, т. е. оно **сохраняется**, если сила тока не бесконечно велика. Этот факт можно интерпретировать следующим образом: **емкостный элемент кратковременно ведет себя подобно источнику постоянного напряжения**. ВАХ источника напряжения — вертикальная прямая. Если его напряжение равно нулю, она совпадает с осью тока, т. е. неотличима от ВАХ закоротки (или замкнутого ключа).

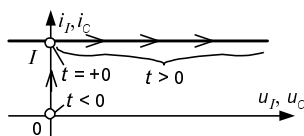


Рис. 2.69

При $t > 0$ изображающая точка должна двигаться горизонтально — по ВАХ источника тока. Куда — вправо или влево? На этот вопрос ответить несложно, если ориентироваться в свойствах элементов.

Смотрим: $i_I = I > 0$. Но, согласно (10.2), $i_C = i_I$. Следовательно, $i_C > 0$.

Если $i_C > 0$, то согласно (10.3) $du_C/dt > 0$. Поскольку производная положительна, функция растет, т. е. изображающая точка движется вправо, причем с постоянной скоростью, т. к. постоянна производная (10.6).

Рассмотрим более сложную задачу (рис. 2.70).

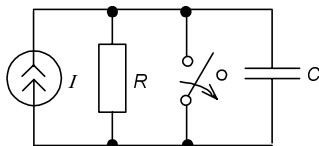


Рис. 2.70

1. $t < 0$. Ключ замкнут и, следовательно, доминирует над остальными элементами. Начальное условие нулевое: $u_C = 0$.
2. $t = +0$. Так как ток, заряжающий емкостный элемент, ограничен (не может быть иным, чем I), его напряжение мгновенно не изменится, т. е. останется равным нулю. При параллельном соединении напряжения всех элементов равны. Следовательно, ток резистивного двухполюсника равен нулю, и ток емкостного элемента равен I .
3. $t > 0$. Перечертим схему, удалив ключ (рис. 2.71, а). **Сгруппируем ненакапливающие элементы в один двухполюсник** (ННД на рис. 2.71, б). Его ВАХ нам известна (см. рис. 2.58). Подумаем, как в этом случае будет двигаться изображающая точка (рис. 2.72). Так же, как и в предыдущей задаче, состояние емкостного элемента в момент $t = +0$ будет характеризоваться точкой $(0; I)$. Опять $i_C > 0$, т. е. $du_C/dt > 0$, и u_C должно расти, т. е. изображающая точка будет двигаться вправо.

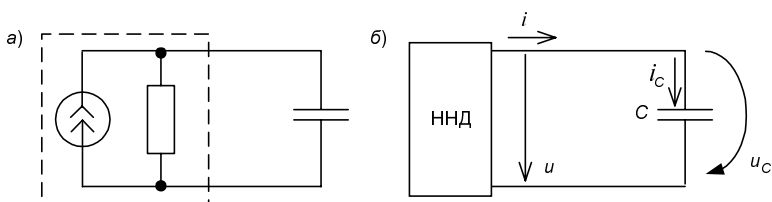


Рис. 2.71

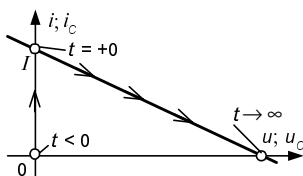


Рис. 2.72

Но теперь имеется существенное отличие: по мере ее движения ток уменьшается. Следовательно, уменьшается и $du_C/dt = i_C/C$, т. е. по мере удаления от оси тока точка движется все медленнее и медленнее. Возникает вопрос: пересечет ли она ось напряжения? Рассуждая аналогично, легко убедиться, что не пересечет. В нижней полуплоскости $i_C = i < 0$. Следовательно, $du_C/dt < 0$, и изображающая точка должна двигаться влево. Этот вывод подтверждается и другими рассуждениями. Рассмотрим их.

По мере приближения к оси напряжения ток неограниченно уменьшается. Следовательно, неограниченно уменьшается и du_C/dt , т. е. крутизна наклона касательной к зависимости $u_C(t)$. Иными словами, прямая $i = 0$ служит асимптотой для тока $i_C(t)$, а прямая $u = RI$ — асимптотой для напряжения $u_C(t)$ (рис. 2.73).

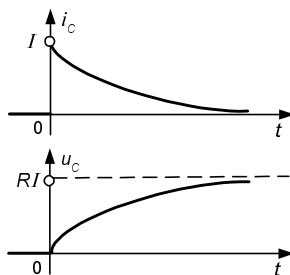


Рис. 2.73

Поскольку параллельной схеме, состоящей из I и R , эквивалентна последовательная схема, содержащая источник напряжения $U = RI$ и тот же резистивный элемент R (см. теорему 6 в п. 9.8), точно такой же результат мы получим для схемы, показанной на рис. 2.74, а. Решим эту задачу формально. Схема замещения для $t \geq 0$ показана на рис. 2.74, б. Направления отсчета выбраны в соответствии с соображениями, изложенными выше. Уравнения Кирхгофа:

$$i_U = i_R = i_C; \quad (10.8)$$

$$u_R + u_C = u_U. \quad (10.9)$$

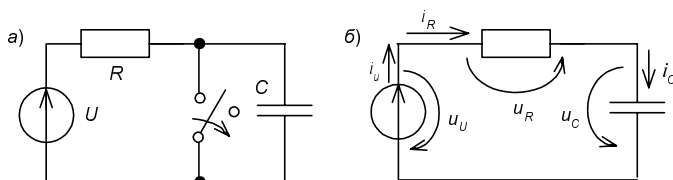


Рис. 2.74

Компонентные законы:

$$u_U = U; \quad (10.10)$$

$$u_R = Ri_R. \quad (10.11)$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}. \quad (10.12)$$

Используя (10.8) и (10.12), преобразуем (10.11):

$$u_R = RC \frac{du_C}{dt}.$$

Подставим правую часть этого равенства вместо u_R (10.9) и используем (10.10):

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Перенесем второй член вправо и поделим на RC :

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{U - u_C}{RC}. \quad (10.13)$$

Таким образом, мы получили дифференциальное уравнение первого порядка. Обратим внимание на его важную особенность. Производная функции пропорциональна самой функции. Многие природные процессы описываются такой зависимостью. Решением уравнения (10.13) служит **экспоненциальная функция**:

$$u_C = U (1 - e^{-t/\tau}), \quad (10.14)$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени.

Теперь сосредоточим внимание на напряжении $u_R(t)$ резистивного элемента. Согласно (10.9) и (10.10)

$$u_R = U - u_C.$$

Напряжение u_C мы нашли (10.14). Поэтому для $t \geq 0$ получим

$$u_R = U e^{-t}$$

(рис. 2.75). Осмыслим этот результат. Значение $u_R = U$ при $t < 0$ обусловлено тем, что ключ замкнут (см. рис. 2.74, а).

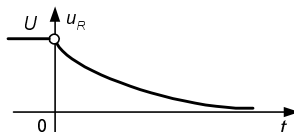


Рис. 2.75

Рассмотрим другую схему, в которой использован не выключатель, а переключатель (рис. 2.76).

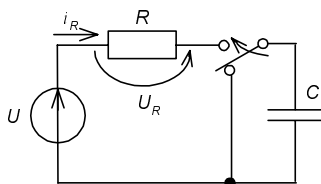


Рис. 2.76

В ней так же, как в предыдущем примере, $u_C = 0$ при $t < 0$, но $i_R = 0$, т. к. резистивный элемент и источник напряжения разъединены. Поэтому временная диаграмма $i_R(t)$ для $t < 0$ выглядит иначе, а для $t \geq 0$ — так же (рис. 2.77).

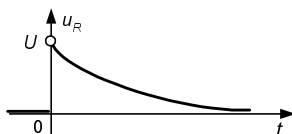


Рис. 2.77

Теперь рассмотрим разрядку заряженного емкостного элемента через резистивный (рис. 2.78). Когда так формулируют задачу, имеют в виду, что в положении 1 переключатель находился произвольно долго, в силу чего емкостный элемент успел зарядиться до напряжения U . Момент переключения обычно обозначают как $t = 0$.

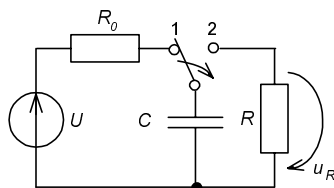


Рис. 2.78

Составив и решив дифференциальное уравнение при ненулевом начальном условии, получим:

$$u_R = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ Ue^{-t/\tau} & \text{при } t \geq 0, \end{cases}$$

т. е. тот же самый результат, что для схемы на рис. 2.76 (см. временную диаграмму на рис. 2.77). Из сопоставления этих результатов можно заключить, что разрядка и зарядка конденсатора происходят одинаково (различным оказывается лишь направление тока емкостного элемента). Это позволяет для анализа схем замещения заменять заряженный до напряжения U_0 емкостный элемент двухполюсником, состоящим из соединенных последовательно разряженного емкостного элемента и источника постоянного напряжения U_0 (рис. 2.79, а). Аналогично индуктивному элементу с током I_0 эквивалентен двухполюсник, содержащий соединенные параллельно индуктивный элемент без тока и источник постоянного тока I_0 (рис. 2.79, б).

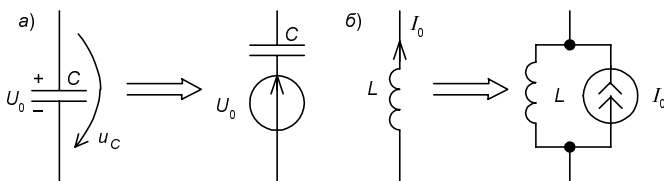


Рис. 2.79

Сколько бы мы ни решали задач, в которых схема замещения состоит из одного накопителя (C или L) и линейного ненакапливающего двухполюсника с постоянными параметрами (например, как на рис. 2.71, б), мы обнаружим, что все переменные изменяются по экспоненциальному закону с одной и той же постоянной времени. Поэтому можно, не составляя и не решая дифференциальные уравнения, сразу писать результаты. Для этого необходимо научиться находить:

- начальное условие — значение напряжения емкостного элемента или тока индуктивного элемента (они определяются предысторией, т. е. тем, что "происходило" в схеме при $t < 0$);
- значения переменных в момент $t = +0$, основываясь на том, что напряжение емкостного элемента сохраняется, если ток не бесконечно велик, и, аналогично, сохраняется ток индуктивного элемента, если напряжение не бесконечно велико;
- значения переменных при $t \rightarrow \infty$;
- постоянную времени — $\tau = RC$ или $\tau = \frac{L}{R} = LG$.

После этого надо начертить временные диаграммы и "перевести" их на язык формул.

Рассмотрим еще один пример, руководствуясь этими правилами (рис. 2.80). Приведем схему к виду, показанному на рис. 2.70, б и найдем характеристики ненакапливающего двухполюсника (ННД) для двух положений ключа,

воспользовавшись методом холостого хода (хх) и короткого замыкания (кз) (см. теорему 7 в п. 9.8).

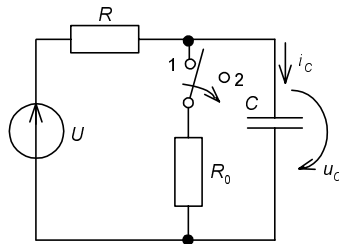


Рис. 2.80

Схема ННД для первого положения переключателя показана на рис. 2.81, *а*. Трехполюсник, составленный из резисторов R и R_0 , подключенный к источнику U , — не что иное, как делитель напряжения. Заменяем его эквивалентной схемой, показанной на рис. 2.81, *б*, воспользовавшись результатами, полученными в п. 9.8 (см. теорему 7):

$$U_{xx} = \frac{R_0 U}{R + R_0}; \quad I_{K3} = \frac{U}{R}; \quad R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_{xx}}{I_{K3}} = \frac{R R_0}{R + R_0}$$

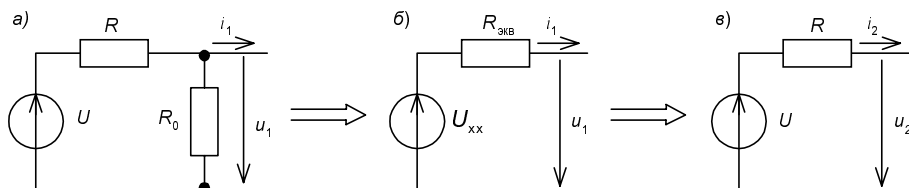


Рис. 2.81

Для второго положения переключателя схема ННД примет вид, показанный на рис. 2.81, *в*.

Вольт-амперные характеристики обоих ННД представлены на рис. 2.82. $(U_{\text{хх}}; 0)$ — точка, изображающая состояние емкостного элемента для $t < 0$.

В момент $t = 0$ она "скакнет" вверх, а затем начнет "скользить" вправо-вниз, стремясь к точке $(U; 0)$.

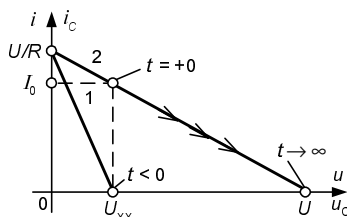
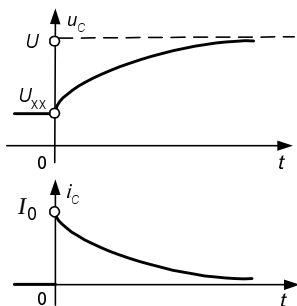


Рис. 2.82

Теперь есть все необходимое, чтобы рисовать временные диаграммы (рис. 2.83). Напряжение u_C экспоненциально растет от уровня U_{xx} до уровня U . "Перевод" этой зависимости на язык формул выглядит так:

$$u_C = \begin{cases} U_{xx} & \text{при } t < 0; \\ U_{xx} + (U - U_{xx}) (1 - e^{-t/\tau}) & \text{при } t \geq 0, \end{cases}$$

где $\tau = RC$.

**Рис. 2.83**

Ток i_C изменяется также экспоненциально:

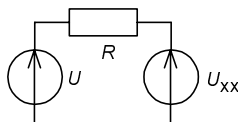
$$i_C = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ I_0 e^{-t/\tau} & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Выражение для величины I_0 найдем из подобия треугольников (см. рис. 2.82):

$$I_0 = \frac{U - U_{xx}}{R}.$$

Эту формулу можно получить и более так сказать "физично", для чего следует начертить схему замещения для момента $t = +0$. Она показана на рис. 2.84. Заряженный емкостный элемент заменен источником постоянного напряжения U_{xx} . Здесь очевидно, что

$$i_{(+0)} = I_0 = \frac{U - U_{xx}}{R}.$$

**Рис. 2.84**

10.3. Основные свойства экспоненты

Так как экспоненциальная функция встречается очень часто, полезно запомнить ее основные свойства.

□ Простейшая таблица значений

t/τ	0	1	2,3	3	4,6
$e^{-t/\tau}$	1	0,37	0,1	0,05	0,01

Из таблицы видно, что экспонента практически достигает нуля при $t = 5\tau$.

□ Перпендикуляр, опущенный из произвольной точки экспоненты, и касательная к ней в этой точке отсекают от асимптоты отрезок, равный τ (рис. 2.85). Зная это свойство и табличные значения, легко провести от руки кривую, близкую к экспоненте.

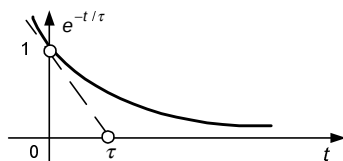


Рис. 2.85

□ Имея временную диаграмму экспоненциальной функции, несложно написать соответствующую ей формулу. Для этого надо прежде всего помнить вид двух зависимостей с отрицательными показателями (рис. 2.86). "Перепад" ("размах") экспоненты при изменении t от 0 до бесконечности равен единице. Если перед экспонентой множитель A , перепад равен A . Экспонента может складываться с константой (величиной, от t не зависящей). График константы — прямая, параллельная оси времени. Чтобы написать формулу, надо выявить константу и перепад. Например, для зависимости на рис. 2.87, a константа равна A_1 , а перепад $A_2 - A_1$. Формула:

$$f_1(t) = A_1 + (A_2 - A_1) e^{-t/\tau}.$$

Для зависимости на рис. 2.87, b константа равна минус A_1 , а перепад $A_1 + A_2$. Формула:

$$f_2(t) = -A_1 + (A_1 + A_2) (1 - e^{-t/\tau}).$$

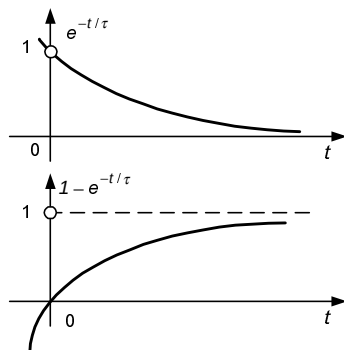


Рис. 2.86

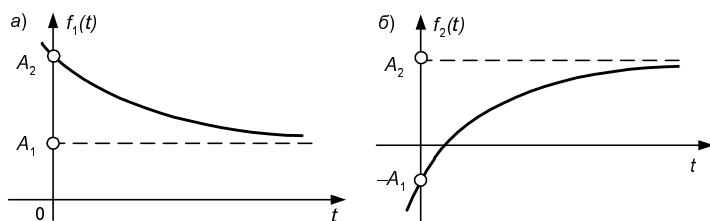


Рис. 2.87

10.4. Нелинейная задача

Все предыдущие задачи были линейными. Теперь решим нелинейную задачу — посмотрим, как разряжается конденсатор через туннельный диод (рис. 2.88).

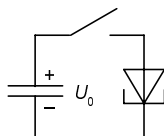


Рис. 2.88

ВАХ туннельного диода показана сплошной линией на рис. 2.89.

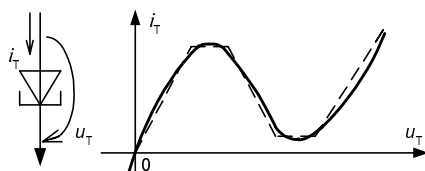


Рис. 2.89

Применим ее кусочно-линейную аппроксимацию (штриховая линия на рис. 2.89). Начертим аппроксимацию в более крупном масштабе, чтобы было удобнее работать с ней (рис. 2.90).

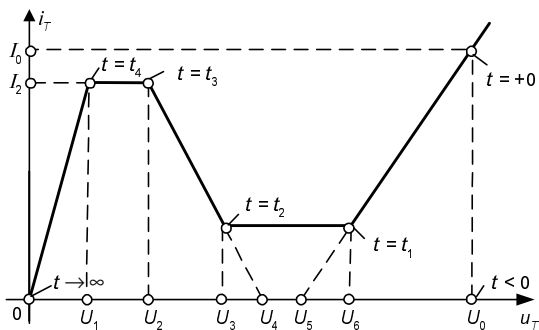


Рис. 2.90

Если конденсатор заряжен до значения U_0 , то в момент $t = +0$ координаты изображающей точки будут: $u_C = U_0$; $i_C = I_0$ (см. рис. 2.90). Руководствуясь правилами знаков, найдем, что при $t > 0$ изображающая точка движется влево-вниз, причем "конечной остановкой" (при $t \rightarrow \infty$), не будь излома характеристики, оказалась бы точка $(U_5; 0)$. Начертим временную диаграмму (рис. 2.91) и напомним формулу

$$u_C = U_5 + (U_0 - U_5) e^{-t/\tau_1}, \quad (10.15)$$

где $\tau_1 = r_1 C$; $r_1 = (U_0 - U_5)/I_0$ (см. рис. 2.90).

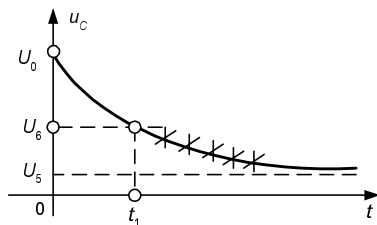


Рис. 2.91

Формула (10.15) верна до момента времени t_1 (см. рис. 2.91), который найдем, решив трансцендентное уравнение

$$U_6 = U_5 + (U_0 - U_5) e^{-t_1/\tau_1}.$$

В момент $t = t_1$ изображающая точка начинает двигаться по горизонтальному участку с постоянной скоростью:

$$u_C = U_6 - \frac{I_1}{C}(t - t_1) \quad \text{при} \quad t_1 \leq t < t_2.$$

Момент t_2 найдем, решив уравнение

$$U_3 = U_6 - \frac{I_1}{C}(t_2 - t_1).$$

В момент t_2 изображающая точка перейдет на "падающий" участок характеристики, где $r_2 = (U_2 - U_4)/I_2 < 0$ (см. рис. 2.90). Из этого следует, что показатель степени экспоненты окажется не отрицательным, а положительным (ее график показан сплошной линией на рис. 2.92). Написать уравнение такой экспоненты просто, если воспользоваться следующим приемом. Экспонента с положительным показателем степени представляет собой зеркальное отражение экспоненты с отрицательным показателем относительно вертикальной прямой. Поэтому описывающие их уравнения совпадают, и можно писать привычное уравнение "зеркального изображения" (пунктир на рис. 2.92):

$$u_C = U_3 + (U_4 - U_3) (1 - e^{-(t-t_2)/\tau_2}) \quad \text{при} \quad t_2 \leq t < t_3,$$

где $\tau_2 = r_2 C$.

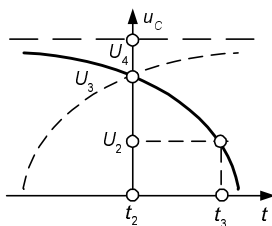


Рис. 2.92

Этот участок закончится в момент t_3 , когда напряжение достигнет уровня U_2 :

$$U_2 = U_3 + (U_4 - U_3) (1 - e^{-(t_3 - t_2)/\tau_2}).$$

Дальше снова следует линейный участок:

$$U_C = U_2 - \frac{I_2}{C}(t - t_3) \quad \text{при} \quad t \leq t_3 < t_4.$$

Момент t_4 найдем из уравнения $U_1 = U_2 - (I_2/C)(t_4 - t_3)$.

Наконец, последний участок:

$$u_C = U_1 e^{-(t-t_4)/\tau_3} \quad \text{при} \quad t \geq t_4,$$

где $\tau_3 = r_3 C$; $r_3 = U_1/I_2$ (см. рис. 2.90).

Временная диаграмма в целом показана на рис. 2.93, а.

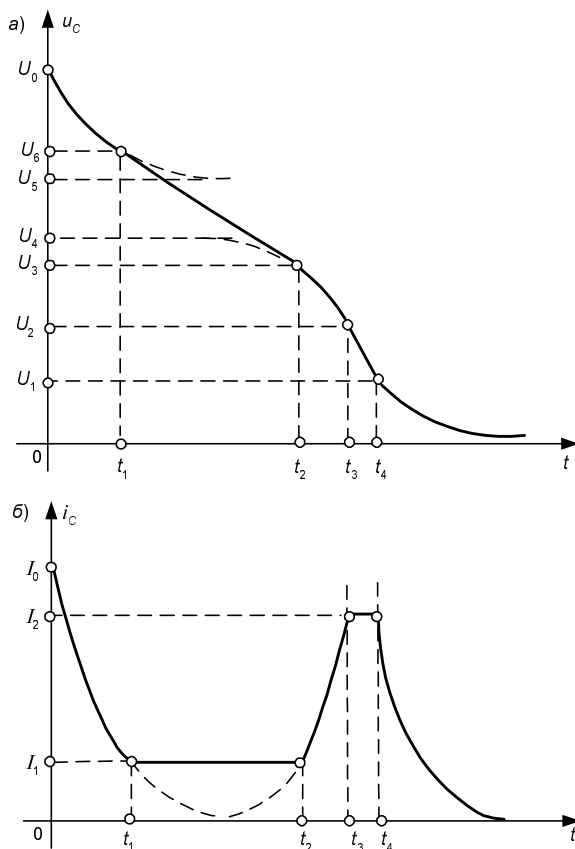


Рис. 2.93

Еще проще построить временную диаграмму тока, т. к. асимптотой для всех экспоненциальных участков служит ось времени (рис. 2.93, б.)

$$i_C = \begin{cases} I_0 e^{-t/\tau_1} & \text{при } 0 \leq t < t_1; \\ I_1 & \text{при } t_1 \leq t < t_2; \\ I_1 e^{-(t-t_2)/\tau_2} & \text{при } t_2 \leq t < t_3; \\ I_2 & \text{при } t_3 \leq t < t_4; \\ I_2 e^{-(t-t_4)/\tau_3} & \text{при } t \geq t_4. \end{cases}$$

В только что рассмотренной аппроксимации были участки трех видов — горизонтальный, наклонный растущий и наклонный падающий. Очевидно, может существовать еще только один вид участка — вертикальный. Для полноты картины надо рассмотреть, как движется изображающая точка по

нему. Поскольку ток емкостного элемента не связан с его энергией, он может изменяться мгновенно. Следовательно, по вертикальному участку изображающая точка "скачет". На временной диаграмме напряжения это отражается в виде излома кривой при переходе с участка на участок. Дело в том, что производная du_C/dt пропорциональна току. Если скачком изменяется ток, скачком должна изменяться и производная напряжения, т. е. наклон касательной к кривой напряжения (рис. 2.94 иллюстрирует эту ситуацию).

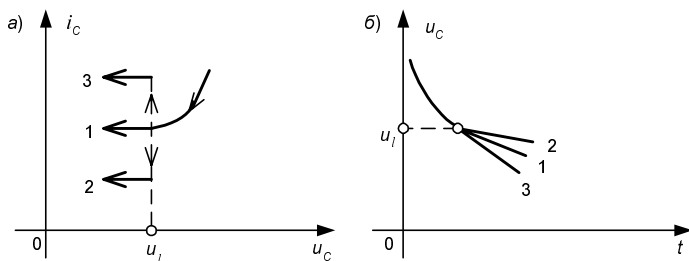


Рис. 2.94

Как видим, используя самые простые средства, можно ориентироваться в довольно сложных ситуациях.

10.5. Операторный метод анализа переходных процессов

Возможность использовать схему замещения с одним накопителем обусловлена тем, что довольно часто разные стадии единого процесса происходят с различной скоростью. Например, на экране осциллографа можно увидеть временную диаграмму, показанную на рис. 2.95, *а*. Скачок слева кажется происходящим мгновенно. Однако если мы сильно (в 100—1000 раз) увеличим скорость развертки осциллографа, то окажется, что напряжение нарастает постепенно, а потом остается постоянным (рис. 2.95, *б*). Ясно, что время нарастания практически не влияет на последующий спад, равно как спад — на нарастание. Поэтому детали разных стадий можно изучать по отдельности. Такой подход универсален — его используют не только в электронике, но и в других науках.

Однако подобным образом процессы развиваются не всегда. Например, чтобы теоретически изучить колебательный процесс в LC-контуре, необходимо ввести в схему замещения и емкостный, и индуктивный элементы. В подобных случаях рассуждения, конечно, тоже полезны, но достаточно точный результат можно получить лишь математическими средствами — используя обыкновенные дифференциальные уравнения. Аналогично, если в схему замещения введен только один накопитель, но воздействие не постоянное, а изменяется во времени, без дифференциальных уравнений не обойтись.

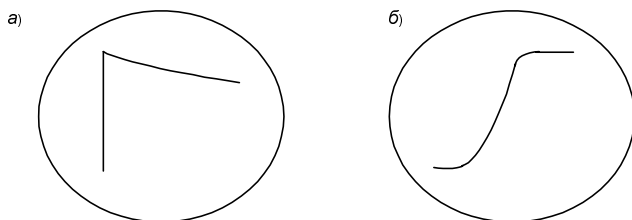


Рис. 2.95

Известен, однако, метод, именуемый **операторным**, позволяющий дифференциальные уравнения даже не составлять. Вместо них составляют и решают алгебраические уравнения. Возможность этого обусловлена наличием взаимно-однозначного соответствия между функциями времени и функциями комплексной переменной p (иногда ее обозначают буквой s).

При использовании этого метода функции времени называют **оригиналами**, а соответствующие им функции p — **изображениями**. Существуют таблицы оригиналов и их изображений. Надо иметь в виду, что функции времени, написанные в таблицах, означают нечто отличное от привычного. Все они при $t < 0$ считаются равными нулю. Например, запись $f(t) = \sin \omega t$ обычно означает, что функция существует от $t \rightarrow -\infty$ до $t \rightarrow \infty$. В таблице же ее значение иное, а именно:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \sin \omega t & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

При использовании операторного метода вводят две малоизвестные функции — единичную: $1(t)$ (функцию Хевисайда) и дельта-функцию: $\delta(t)$ (функцию Дирака).

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Ее временная диаграмма показана на рис. 2.96.

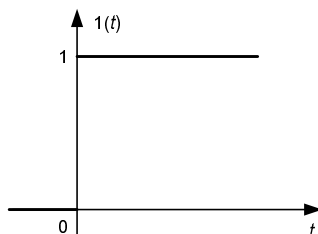


Рис. 2.96

Любая функция времени, помещенная в таблицу, может быть представлена как произведение функции Хевисайда и "привычной" функции времени.

Функцию Дирака вводят так. Представим себе прямоугольный импульс длительностью θ и высотой $1/\theta$ (рис. 2.97). Он превратится в δ -функцию, если $\theta \rightarrow 0$. Высота импульса при этом стремится к бесконечности, но площадь остается равной единице. δ -функцию можно рассматривать как производную функции Хевисайда.

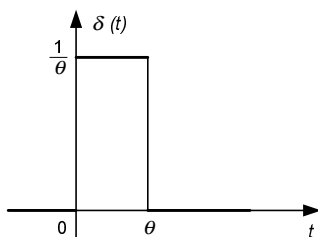


Рис. 2.97

Правила применения операторного метода просты.

1. Метод применим только к линейным моделям.
2. Изображение, соответствующее $f(t)$, будем обозначать через $\hat{f}(p)$: $f(t) \Leftrightarrow \hat{f}(p)$.
3. Таблицы оригиналов и их изображений существуют двух видов. В одних приведены изображения по Лапласу, в других — по Карсону. Они просто преобразуются друг в друга: $\hat{f}_K(p) = p\hat{f}_L(p)$. Применение той или иной формы изображения определяется привычкой. В табл. 2.1 приведены изображения по Карсону.
4. Компонентный закон для элементов R , L , C один и тот же:

$$\hat{u}(p) = Z(p)\hat{i}(p).$$

5. Выражения $Z(p)$ для разных элементов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.1

	$f(t)$	$\hat{f}(p)$
1	δ	p
2	1	1
3	t	$1/p$

Таблица 2.1 (продолжение)

	$f(t)$	$\hat{f}(p)$
4	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{p+a}$
5	e^{-at}	$\frac{p}{p+a}$
6	$\frac{1}{a}(t - \frac{1}{a}(1 - e^{-at}))$	$\frac{1}{p(p+a)}$
7	$\frac{1}{a^2}(1 - \cos at)$	$\frac{1}{p^2 + a^2}$
8	$\frac{1}{a}\sin at$	$\frac{p}{p^2 + a^2}$
9	$\cos at$	$\frac{p^2}{p^2 + a^2}$
10	$\frac{1}{a^2}(chat - 1)$	$\frac{1}{p^2 - a^2}$
11	$\frac{1}{a}chat$	$\frac{p}{p^2 - a^2}$
12	$chat$	$\frac{p^2}{p^2 - a^2}$
13	$\frac{1}{a^2}(1 - (1 + at)e^{-at})$	$\frac{1}{(p-a)^2}$
14	te^{-at}	$\frac{p}{(p+a)^2}$
15	$\frac{1}{a(a-b)}e^{-at} + \frac{1}{b(b-a)}e^{-bt} + \frac{1}{ab}$	$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$
16	$\frac{1}{a-b}(e^{-bt} - e^{-at})$	$\frac{p}{(p+a)(p+b)}$
17	$\frac{(c-b)e^{-at} + (a-c)e^{-bt} + (b-a)e^{-ct}}{(a-b)(b-c)(c-a)}$	$\frac{p}{(p+a)(p+b)(p+c)}$

Таблица 2.2

Элемент	$Z(p)$
R	R
L	pL
C	$1/pC$

6. Если $f(t) \Leftrightarrow \hat{f}(p)$, а $A = \text{const}$, то $Af(t) \Leftrightarrow A\hat{f}(p)$
7. Если $f_1(t) \Leftrightarrow \hat{f}_1(p)$ и $f_2(t) \Leftrightarrow \hat{f}_2(p)$, то $f_1(t) + f_2(t) \Leftrightarrow \hat{f}_1(p) + \hat{f}_2(p)$, но $f_1(t) \cdot f_2(t) \nLeftrightarrow \hat{f}_1(p) \cdot \hat{f}_2(p)$.
8. Сдвигу оригинала по оси времени на величину θ соответствует умножение изображения на $e^{-p\theta}$: $f(t - \theta) \Leftrightarrow e^{-p\theta} \hat{f}(p)$.
9. В соответствии с п. 7 уравнения Кирхгофа пишут так же, как для функций времени.
10. В случае ненулевых начальных условий заряженный емкостный элемент и индуктивный элемент с током заменяют в соответствии с правилом, показанным на рис. 2.79 (источники постоянного напряжения и тока учитывают так же, как воздействующие).

Процедура решения состоит в следующем. Используя структурные и компонентные законы, приходят к результату вида

$$Y(p) = K(p)\hat{x}(p), \quad (10.16)$$

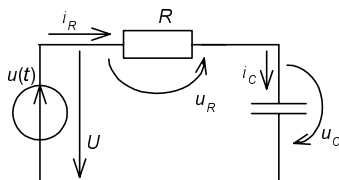
где $Y(p)$ — искомый ток или напряжение;

$K(p)$ — коэффициент, зависящий только от параметров схемы (всех R , L и C , в нее входящих);

$\hat{x}(p)$ — изображение воздействия, включая начальные условия.

Зная $x(t)$, в табл. 2.1 находят его изображение и подставляют в формулу (10.16). Приводят это выражение к табличному виду и выписывают из нее искомую функцию времени. Если начальное условие было ненулевым, прибавляют его к этому результату.

Уясним процедуру на примере типичной задачи (рис. 2.98). Необходимо найти зависимость $u_C(t)$, если известно $u(t)$. При такой постановке задачи предполагают, что при $t < 0$ значение $u(t)$ было постоянным, например, U_0 , и емкостный элемент зарядился до этого значения, т. е. начальное условие равно U_0 .

**Рис. 2.98**

Чтобы найти множитель $K(p)$, знать вид зависимости $u(t)$ не надо.

Приступим к решению. Искомое напряжение проще всего выразить через ток:

$$\hat{u}_C = (1/pC)\hat{i}_C. \quad (10.17)$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\hat{i}_C = \hat{i} = \hat{i}_R.$$

Выражение для тока представим через данные, воспользовавшись вторым законом Кирхгофа:

$$\hat{u}_R + \hat{u}_C = \hat{u};$$

$$R\hat{i} + (1/pC)\hat{i} = \hat{u};$$

$$i = \frac{\hat{u}}{R + 1/pC}.$$

Подставим правую часть последнего равенства в (10.17):

$$\hat{u}_C = \frac{1/pC}{R + 1/pC} \hat{u}. \quad (10.18)$$

Рассмотрим конкретное воздействие:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Эту функцию можно представить в виде $u(t) = U 1(t)$.

В табл. 2.1 функция $1(t)$ находится во второй строке. Учитывая правило 6, получим

$$\hat{u}(p) = U.$$

Подставим это выражение в формулу (10.18):

$$u_C = \frac{1/pC}{R + 1/pC} U. \quad (10.19)$$

Тем самым мы получили искомое изображение. Чтобы найти функцию времени, надо отыскать в таблице подходящее изображение. После несложных преобразований формулы (10.19) получим

$$\hat{u}_c = \frac{U}{RC} \cdot \frac{1/pc}{R+1/pc}.$$

Правый сомножитель совпадает с изображением в строке 4 табл. 2.1, если положить $a = I/RC$.

Поэтому для $t \geq 0$ получим

$$u_C(t) = U(1 - e^{-t/RC}).$$

Немного усложним задачу:

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{при } t < 0; \\ U_2 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Теперь начальное условие равно U_1 . Чтобы его учесть для $t \geq 0$, последовательно с емкостным элементом введем в схему источник постоянного напряжения U_1 (рис. 2.99, а). При этом следует помнить, что искомое напряжение u_C включает в себя U_1 , т. е. $u_C = U_1 + \tilde{u}_C$. Присоединим U_1 к действующему источнику (рис. 2.99, б). Теперь мы имеем задачу, тождественную предыдущей. Поэтому сразу запишем

$$\tilde{u}_C = (U_2 - U_1)(1 - e^{-t/RC}),$$

откуда

$$u_C = U_1 + (U_2 - U_1)(1 - e^{-t/RC}).$$

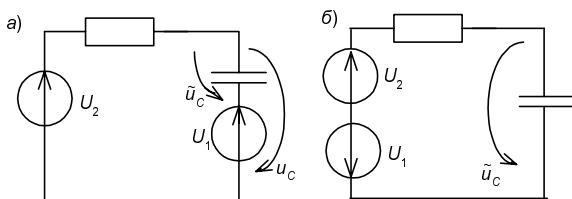


Рис. 2.99

Ответы к первым двум задачам мы могли бы написать, не пользуясь операторным методом. Но теперь возьмем действующее напряжение, линейно нарастающее со временем:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \gamma t & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

В табл. 2.1 находим изображение этого оригинала (строка 3) и подставляем его в формулу (10.18), не забыв множитель γ :

$$\hat{u}_C = \frac{1/p}{R + 1/p} \cdot \frac{\gamma}{p} = \frac{1}{p(p + 1/RC)}.$$

Это изображение находим в 6-й строке табл. 2.1. Ему соответствует оригинал

$$u_C(t) = \gamma t - \gamma RC (1 - e^{-t/RC}).$$

В графической форме результат представлен на рис. 2.100.

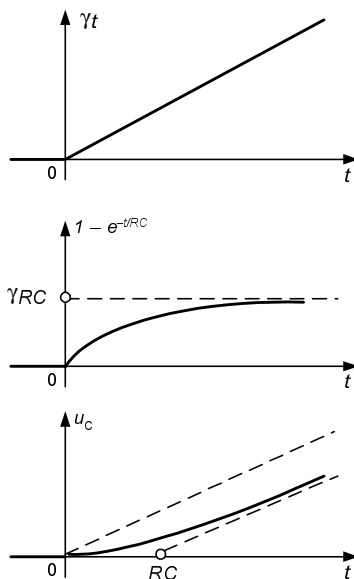


Рис. 2.100

Наконец, рассмотрим еще более сложное воздействие:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \sin \omega t & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Его изображение находим в 8-й строке табл. 2.1. Подставив в формулу (10.20) и преобразовав, получим

$$\hat{u}_C = \frac{U_m \omega}{\tau} \cdot \frac{1}{(p + 1/\tau)(p^2 + \omega^2)}, \quad (10.20)$$

где $\tau = RC$.

Такого изображения в табл. 2.1 нет. Но если представить

$$p^2 + \omega^2 = (p + j\omega)(p - j\omega),$$

то получим соответствие строке 17 табл. 2.1:

$$a = 1/\tau, \quad b = j\omega, \quad c = -j\omega.$$

Найдем отдельно числитель и знаменатель

$$\text{Числ.} = -2j\omega e^{-t/\tau} + (1/\tau) (e^{-j\omega t} - e^{-j\omega t}) + j\omega (e^{-j\omega t} + e^{-j\omega t}).$$

Воспользуемся формулами Эйлера:

$$\sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2j}; \quad \cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}.$$

$$\text{Числ.} = -2j(\omega e^{-t/\tau} + (1/\tau) \sin \omega t - \omega \cos \omega t).$$

$$\text{Знам.} = -2j\omega (1/\tau^2 + \omega^2).$$

Вернемся к формуле (10.20):

$$u_C = \frac{U_m}{\omega\tau + 1/\omega\tau} e^{-t/\tau} + \frac{U_m}{u\tau + 1/\omega\tau} ((1/\omega\tau) \sin \omega t - \cos \omega t).$$

Преобразуем второе слагаемое, обозначив его u_{C2} и применив формулу

$$a \sin \omega t + b \cos \omega t = A \sin(\omega t + \psi),$$

где $A = \sqrt{a^2 + b^2}$; $\operatorname{tg} \psi = b/a$:

$$u_{C2} = \frac{U_m}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} \sin(\omega t + \psi); \quad \psi = \operatorname{arctg}(-\omega\tau).$$

Окончательно

$$u_C = \frac{U_m}{\omega\tau + 1/\omega\tau} e^{-t/\tau} + \frac{U_c}{\sqrt{(\omega\tau^2 + 1)}} \sin(\omega t + \psi). \quad (10.21)$$

Проверим результат следующим образом. Так как начальное условие нулевое, а ток зарядки емкостного элемента ограничен резистивным элементом (см. рис. 2.98), должно быть $u_C(+0) = 0$. Подставим $t = 0$ в формулу (10.21):

$$u_C(0) = U_m \left(\frac{1}{\omega\tau + 1/\omega\tau} + \frac{1}{\sqrt{(\omega\tau^2 + 1)}} \sin \psi \right).$$

Воспользуемся формулой $\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$:

$$u_C(0) = U_m \left(\frac{1}{\omega\tau + 1/\omega\tau} - \frac{1}{\omega\tau + 1/\omega\tau} \right) = 0.$$

Этот вывод очень поучителен. Сколько бы мы ни решали подобных задач с внезапным включением гармонического воздействия, мы всегда получим результат, состоящий из двух слагаемых. Первое быстро затухает и остается только гармоническая составляющая — такая же, какой она была бы в слу-

чае начала процесса при $t \rightarrow -\infty$. Это позволяет анализировать так называемые цепи переменного тока, когда не интересуются переходными процессами, пользуясь **символическим методом (методом комплексных амплитуд)**.

Хотя имеются книги с таблицами оригиналов и изображений, далеко не всегда удастся найти в них изображение, которое мы получили, решая задачу. В таких случаях используют алгебраические преобразования, в частности, разложение на простые дроби.

10.6. Парадоксальный пример

Обсудим теоретически следующий эксперимент. Цепь состоит из источника питания, конденсатора и выключателя (рис. 2.101, а). Как изменяются ток и напряжение конденсатора после замыкания ключа, если в исходном состоянии он разряжен?

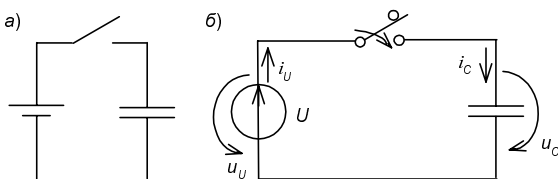


Рис. 2.101

Составим схему замещения, заменив источник питания источником напряжения, конденсатор — емкостным элементом, а выключатель — идеальным ключом (рис. 2.101, б). Воспользуемся операторным методом.

$$\begin{aligned} \hat{i}_C(p) &= pC\hat{u}_C(p) \\ \downarrow \quad \quad \quad \hat{u}_C &= \hat{u}_U \\ \hat{i}_C(p) &= pCU \quad \quad \quad \hat{u}_U = U \end{aligned}$$

Изображение в виде p находим в первой строке табл. 2.1 п. 10.5. Оригиналом для него служит δ -функция. Константа CU — размер заряда, переданного емкостному элементу δ -импульсом тока.

Осмыслим результат. Получается, что напряжение емкостного элемента изменяется **мгновенно** от 0 до U и одновременно (мгновенно же) протекает заряд, равный CU . Вместе с тем, мы знаем, что напряжение конденсатора не может мгновенно измениться на конечную величину, т. е. **кратковременно** он ведет себя как источник постоянного напряжения. Обусловлено это тем, что конденсатор — **накопитель** и его энергия однозначно связана с напряжением: $W_C = Cu_C^2/2$. Источников бесконечной мощности в природе не существует. Поэтому энергия (а значит и напряжение u_C) мгновенно изменяться не могут. В чем же тут дело?

В рамках тех мысленных моделей, которыми мы воспользовались, полученный результат **внутренне непротиворечив**. По определению источника напряжения его ток не ограничен и, следовательно он может обеспечить протекание импульса тока в форме δ -функции. А как быть с реальностью?

Дело в том, что применимость всех мысленных моделей ограничена. Вспомним, например ВАХ фотоэлемента (рис. 2.19). Ток фотоэлемента конечен. Наиболее простая аппроксимация его ВАХ — прямоугольная (рис. 2.102, а).

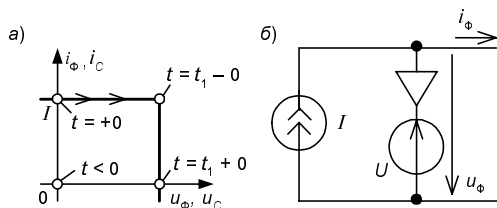


Рис. 2.102

Ей соответствует схема замещения, показанная на рис. 2.102, б. Процесс зарядки емкостного элемента от такого источника легко проследить, представив себе траекторию движения изображающей точки. Так как начальное условие нулевое ($u_C(-0) = 0$), а ток конечен (равен I), $u_C(+0) = u_C(-0)$, и координаты изображающей точки в момент $t = +0$ будут иметь значения: $u_C = 0$; $i_C = I$. При $t > 0$ точка движется вправо со скоростью $du_C/dt = I/C$. Момент $t = t_1$, когда точка достигнет вершины угла, легко найти, приравняв друг другу выражения заряда через напряжение и силу тока: $CU = It_1$; $t_1 = CU/I$. Временные диаграммы тока зарядки и напряжения емкостного элемента показаны на рис. 2.103. Чем больше ток, тем меньше времени требуется для достижения напряжения, равного U . Отсюда ясно, что $t_1 \rightarrow 0$ при $I \rightarrow \infty$, т. е. получается именно δ -функция.

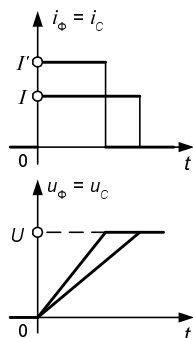


Рис. 2.103

Но не только ограниченность тока источника не позволяет конденсатору заряжаться или разряжаться мгновенно. Ведь формула $q_C = C u_C$ (или $i_C = C du_C/dt$) и точно описываемый ею емкостный элемент — **простейшая** мысленная модель конденсатора. В действительности при зарядке или разрядке конденсатора течет ток и, следовательно, имеется изменяющееся магнитное поле. Этот факт требует включить в схему замещения конденсатора индуктивный элемент (рис. 2.104). При сравнительно небольших скоростях изменения силы тока роль индуктивного элемента пренебрежимо мала, но с ростом di_C/dt она увеличивается, и это тоже не позволяет емкостному элементу разряжаться или заряжаться мгновенно.



Рис. 2.104

Так что же, результат, полученный в начале данного пункта лишен какого-либо физического смысла? Нет. Вспомним начало п. 10.5. Если наше внимание сосредоточено на медленной стадии процесса, то быструю стадию допустимо (а иногда и необходимо) считать происходящей мгновенно.

10.7. Дуальность

Мы познакомились с переходными процессами на примере задач с емкостным накопителем. Почему предпочтение было отдано именно ему? Во-первых, в большинстве практических случаев, когда в цепи нет конденсаторов и индуктивных катушек и требуется учитывать только поля в пространстве между элементами, влияние электрического поля значительно сильнее, чем магнитного. Поэтому емкостные элементы вводят в схемы замещения значительно чаще, чем индуктивные. Во-вторых, конденсаторы используют в транзисторных цепях значительно больше, чем индуктивные катушки.

В-третьих, имея решения для схем с емкостными элементами, легко преобразовать их в решения с индуктивными элементами. Обусловлено это явлением, именуемым **дуальностью**. Состоит оно в своеобразной аналогичности схем.

Вспомним эквивалентность последовательной и параллельной схем замещения источника питания (см. теорему 6 в п. 9.8). Эти схемы не только эквивалентны, но и дуальны друг другу: формулы, описывающие их поведение переходят друг в друга, если токи и напряжения поменять местами, а R заменить на G :

$$u = U - Ri;$$

$$i = I - Gu.$$

Аналогично дуальны друг другу источник напряжения и источник тока $u_U = U$ и $i_I = I$; короткая и разрыв: $u_3 = 0$ и $i_p = 0$; емкостный и индуктивный элементы: $i_C = Cdu_C/dt$ и $u_L = Ldi_L/dt$; последовательное и параллельное соединение резисторов: $R_\Sigma = \sum R$ и $G_\Sigma = \sum G$ и многие другие схемы.

Параллельной схеме с емкостным элементом на рис. 2.70 дуальна последовательная схема с индуктивным накопителем, показанная на рис. 2.105.

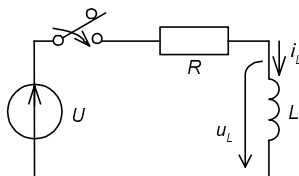


Рис. 2.105

Временные диаграммы (см. рис. 2.73) окажутся теми же самыми, если поменять местами: $C \rightarrow L$; $I \rightarrow U$; $R \rightarrow G$; $u_C \rightarrow i_L$; $i_C \rightarrow u_L$; (рис. 2.106).

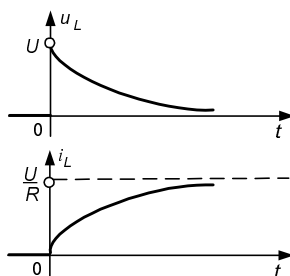


Рис. 2.106

Совершенно аналогична ситуация в прикладной механике: есть дуальные друг другу расчетные схемы (аналог схем замещения), причем дуальны такие величины, как сила и скорость, масса и величина, обратная коэффициенту жесткости пружины. В связи с этим оказывается, что возможны четыре вида электро-механических аналогий.

§ 11. Биполярные транзисторы

11.1. Общие сведения

Наиболее массовыми представителями трехполюсников являются транзисторы. Основное назначение транзистора — быть управляющим элементом в усилительном каскаде. Подавляющее большинство транзисторов изготавливают из кремния. Известны два вида транзисторов — биполярные и унипо-

лярные (полевые). Различие их названий обусловлено тем, что в первых протекание тока обусловлено движением носителей обоих знаков — электронов и дырок, а во вторых — либо только электронами, либо только дырками. Более полно изучить процессы в транзисторных цепях можно на примере биполярных транзисторов, поэтому мы и рассматриваем именно их.

Биполярный транзистор представляет собой трехслойный "сэндвич". Тип проводимости наружных слоев одинаков, внутреннего — противоположен. К каждому слою прикреплены металлические выводы, с помощью которых транзистор присоединяют к другим элементам цепи. Существует две разновидности транзисторов, различающихся чередованием полупроводниковых слоев — $n-p-n$ и $p-n-p$.

Согласно системному подходу элементы цепи достаточно рассматривать чисто феноменологически. Однако практика показывает, что небольшая доза механизмического описания способствует лучшему пониманию и усвоению поведения транзисторов. Поэтому поговорим немного об их структуре и внутренних процессах на примере транзистора $n-p-n$.

Структура транзистора типа $n-p-n$ в разрезе схематически показана на рис. 2.107, а (см. также рис. 1.15). Верхний слой называют **эмиттером**, средний — **базой**, нижний — **коллектором**. Хотя по типу проводимости коллектор и эмиттер одинаковы, количественно их свойства различаются из-за различия размеров областей и концентрации основных носителей (электронов).

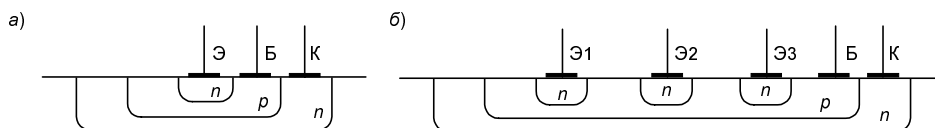


Рис. 2.107

Входом транзистора, вообще говоря, может служить как пара выводов база-эмиттер, так и пара база-коллектор. Однако из-за упомянутых различий эффективность управления выходным током в первом случае значительно выше — коэффициент передачи тока базы (см. дальше) в десятки раз больше. При использовании в качестве входа промежутка база-эмиттер включение называют **нормальным**, другое — **инверсным** (обратным).

Описывая поведение $p-n$ -перехода в электрической цепи, используют термины *прямое смещение* и *обратное смещение*. Если $u_{pn} > 0$, говорят, что $p-n$ -переход "смещен в прямом направлении", при $u_{pn} < 0$ — "смещен в обратном направлении". Механизм прохождения тока в транзисторе состоит в том, что при прямом смещении эмиттерно-базового перехода электроны **инжектируются** (вводятся) из эмиттера в базу и перемещаются к коллектору. Если коллекторно-базовый переход смещен в обратном направлении или

смещен в прямом направлении, но меньше, чем эмиттерно-базовый переход, электроны **экстрактируются** (извлекаются) коллектором. Толщина слоя базы чрезвычайно мала. Поэтому при указанных условиях электроны, проходя сквозь базу, почти не "теряются". В результате ток коллектора почти равен току эмиттера, а ток базы, грубо говоря, в сотню раз меньше.

Для автоматизации выполнения логических операций в соответствующих (логических) микросхемах при их производстве формируют транзисторы, именуемые **многоэмиттерными** (на рис. 2.107, б показан транзистор с тремя эмиттерами). В логических элементах типа И²Л (интегральная инжекционная логика) транзисторы используют в инверсном включении (слой, бедный примесями, оказывается эмиттером). В результате этого транзисторы оказываются "многоколлекторными".

11.2. Статические характеристики транзистора

Поведение транзистора в статическом режиме описывают парой семейств характеристик. В справочниках принято приводить характеристики при отсчете напряжений по отношению к эмиттеру, т. е. при включении с ОЭ (рис. 2.108, а), или по отношению к базе (включение с ОБ, рис. 2.108, б). В качестве "аргументов" большей частью используют следующие пары переменных: $\{u_{\text{вх}}; u_{\text{вых}}\}$; $\{i_{\text{вх}}; i_{\text{вых}}\}$; $\{i_{\text{вх}}; u_{\text{вых}}\}$. Выбор той или иной пары определяется удобством расчета, т. е., большей частью, привычкой инженера. Мы будем пользоваться третьей парой.

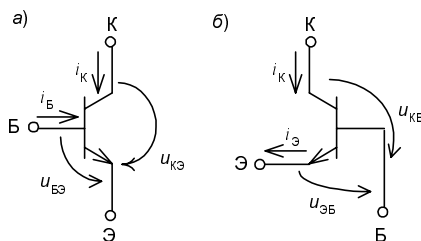


Рис. 2.108

Семейства характеристик маломощного кремниевого транзистора, снятые при включении с ОЭ (см. рис. 2.108, а), показаны на рис. 2.109. Напряжение $U_{\text{БО}}$ при комнатной температуре примерно равно 0,5 В. В рабочем диапазоне токов ($\Delta i_{\text{Б}}$, рис. 2.109, а) напряжение база-эмиттера $U_{\text{БЭ}} = 0,7 \pm 0,1$ В (при анализе цепей это напряжение мы будем обозначать буквой $U_{\text{Б}}$). Отрицательный ток базы резко возрастает (третий квадрант) при напряжении в несколько вольт (эту область характеристик обычно не используют).

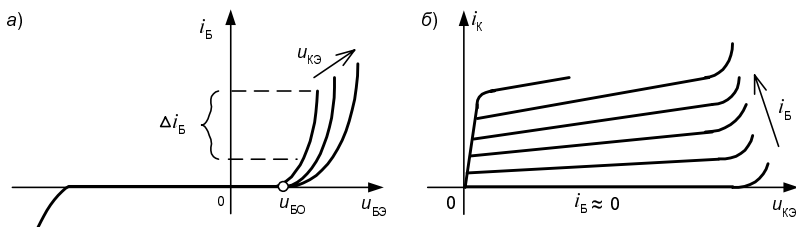


Рис. 2.109

Выходные характеристики (см. рис. 2.109, б) имеют три хорошо различимых участка. Крутые участки слева укладываются примерно в 0,2 В. Пологие участки занимают обычно десятки вольт (у некоторых транзисторов — сотни). Крутые участки, следующие за ними, обычно не используют.

Пологие участки выходных характеристик — почти прямые. Их продолжения влево пересекают ось напряжения в разных, но близких точках. Поэтому точность расчетов оказывается удовлетворительной, если положить, что все они пересекаются в одной точке ($-V_A$; 0) (рис. 2.110). Для интегральных транзисторов значение V_A находится в пределах от 100 до 300 В [12, с. 565—566]. Это позволяет просто оценивать значение дифференциального сопротивления r_K , соответствующего пологому участку выходной характеристики:

$$r_K = \frac{V_A}{i_\Gamma}, \quad (11.1)$$

где i_Γ — ордината точки пересечения продолжения пологого участка выходной характеристики с осью i_K (на рис. 2.110 эти точки обозначены кружочками).

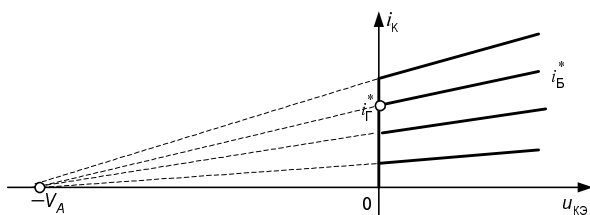


Рис. 2.110

При анализе транзисторных цепей очень важное значение имеет параметр B — **коэффициент передачи тока базы**. Определим его. Каждому значению тока i_B соответствует определенное значение тока i_Γ (например, $i_B^* \rightarrow i_\Gamma^*$, см. рис. 2.110). Построим по точкам зависимость i_Γ от i_B (сплошная кривая на рис. 2.111). Она нелинейна, но, как показывает практика, вполне приме-

нима ее линейная аппроксимация (штриховая прямая на рис. 2.111). Ей соответствует следующая формула:

$$i_{\Gamma} = B i_{\text{Б}}. \quad (11.2)$$

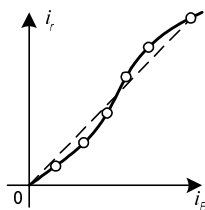


Рис. 2.111

Значение B обычно лежит в пределах 50...200.

Масштабы по осям тока обоих семейств характеристик на рис. 2.109 соответствуют нормальному рабочему режиму транзистора. Поэтому на них не видны детали, соответствующие значительно меньшим значениям токов — они укладываются в толщину осевых линий. Если масштаб по оси тока входных характеристик увеличить в десятки раз, а выходных — в тысячи раз, то мы получим зависимости, показанные на рис. 2.112.

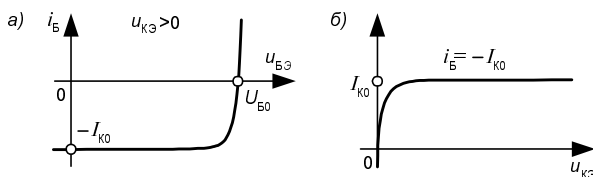


Рис. 2.112

При разработке транзисторных устройств эти и многие другие особенности транзисторов учитывают. Но для понимания основного характера процессов в транзисторных цепях ими можно пренебречь.

11.3. Кусочно-линейная аппроксимация характеристик и полносигнальная схема замещения транзистора

В соответствии с рекомендациями, сформулированными в п. 9.7, и видом семейств характеристик транзистора (см. рис. 2.109 и рис. 2.110) кусочно-линейные аппроксимации можно представить, как показано на рис. 2.113.

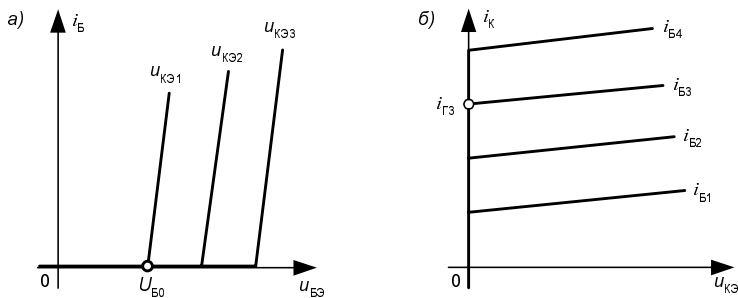


Рис. 2.113

В схеме замещения промежутка база-эмиттер (рис. 2.114, а), очевидно, должны присутствовать уже знакомые нам идеальные двухполюсники: резистивный элемент $r_B = \Delta u_{БЭ} / \Delta i_B$, последовательно с ним — источник постоянного напряжения $U_{Б0}$ и идеальный вентиль В1. Кроме того, для отображения сдвига характеристики вправо под влиянием напряжения $u_{КЭ}$ (см. рис. 2.113, а), необходимо ввести новый идеальный двухполюсник — зависимый источник напряжения $U_{Б\text{зав}} = \mu u_{КЭ}$. **Зависимыми** называют источники, напряжение или ток которых зависят от переменной, не входящей в данный контур. Чтобы отличить от независимых источников, их обозначают на схемах замещения ромбами рис. 2.114, а).

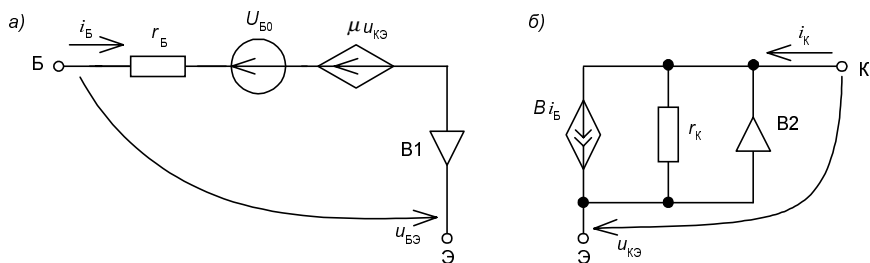


Рис. 2.114

Схема замещения промежутка коллектор-эмиттер состоит из соединенных параллельно зависимого источника тока $i_T = B i_B$ (см. формулу (11.2)), резистивного элемента r_K (см. формулу (11.1)) и идеального вентиля В2 (рис. 2.114, б).

Дополнительный анализ позволяет связать полученные два фрагмента в схему замещения транзистора (рис. 2.115), которую можно назвать **полно-сигнальной**, т. к. она пригодна для анализа режима большого сигнала.

Ей соответствует четырехкомпонентная схема замещения (рис. 2.117).

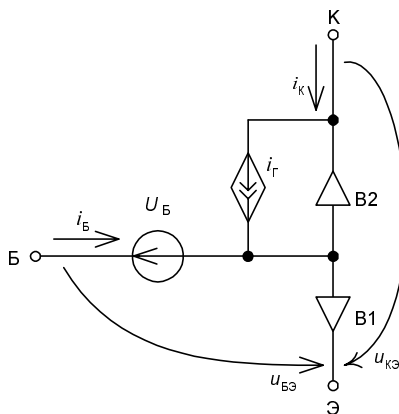


Рис. 2.117

В ряде случаев, когда транзистор работает в режиме переключения (см. п. 9.3), т. е. изображающая точка быстро "пробегают" активную область, "задерживаясь" в области отсечки и области насыщения, промежуток К—Э целесообразно замещать идеальным ключом. Это разумно делать в тех случаях, когда время переключения транзистора значительно меньше постоянных времени, обусловленных другими элементами цепи. Примеры такого использования ключа приведены в § 10 и § 16.

11.4. Малосигнальные параметры и схема замещения транзистора

При работе транзистора в режиме малого сигнала (в аналоговых элементах, см. п. 12.1) переменные изменяются в пределах небольших областей, обозначенных на рис. 2.118 штриховыми окружностями в окрестностях точек А, соответствующих постоянным составляющим токов и напряжений (см. п. 9.5).

Для анализа такого режима вводят параметры, называемые малосигнальными (дифференциальными), определяя их следующим образом.

Допустим, семейства характеристик транзистора для включения с ОЭ (см. рис. 2.109.) представлены так:

$$\left. \begin{aligned} u_{БЭ} &= f_1(i_{Б}; u_{КЭ}); \\ i_{К} &= f_2(i_{Б}; u_{КЭ}). \end{aligned} \right\} \quad (11.4)$$

Напишем полные дифференциалы:

$$\left. \begin{aligned} du_{БЭ} &= \frac{\partial f_1}{\partial i_B} di_B + \frac{\partial f_1}{\partial u_{КЭ}} du_{КЭ}; \\ di_K &= \frac{\partial f_2}{\partial i_B} di_B + \frac{\partial f_2}{\partial u_{КЭ}} du_{КЭ}. \end{aligned} \right\} \quad (11.5)$$

С целью сокращения записи введены стандартные обозначения частных производных (их называют h -параметрами ("аш-параметрами")):

$$\begin{aligned} h_{11Э} &= \frac{\partial f_1}{\partial i_B}; & h_{12Э} &= \frac{\partial f_1}{\partial u_{КЭ}}; \\ h_{21Э} &= \frac{\partial f_2}{\partial i_B}; & h_{22Э} &= \frac{\partial f_2}{\partial u_{КЭ}}. \end{aligned}$$

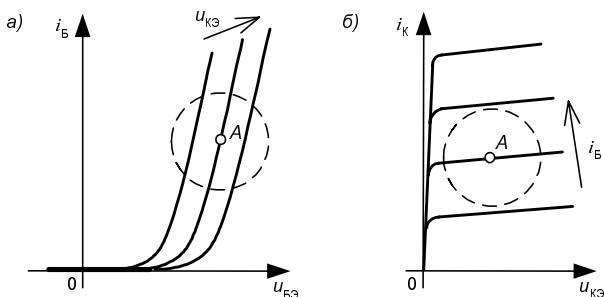


Рис. 2.118

Нетрудно понять, что $h_{11Э}$ имеет размерность сопротивления, $h_{22Э}$ — размерность проводимости, а $h_{12Э}$ и $h_{21Э}$ безразмерны. Эти величины называют малосигнальными (дифференциальными) параметрами. Так же, как в п. 9.5, их считают постоянными в окрестностях точки A (см. рис. 2.118), т. е. пренебрегают нелинейностью характеристик. Этой аппроксимации соответствует замена бесконечно-малых изменений переменных di_B , $du_{БЭ}$, di_K , $du_{КЭ}$ в уравнениях (11.5) малыми, но конечными — $\tilde{i}_B$, $\tilde{u}_{БЭ}$, $\tilde{i}_K$, $\tilde{u}_{КЭ}$, т. е. переменными составляющими сигнала:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{u}_{БЭ} &= h_{11Э} \tilde{i}_B + h_{12Э} \tilde{u}_{КЭ}; \\ \tilde{i}_K &= h_{21Э} \tilde{i}_B + h_{22Э} \tilde{u}_{КЭ}. \end{aligned} \right\} \quad (11.6)$$

Поскольку зависимости (11.4) заданы не аналитически, а графически, значения h -параметров находят по семействам характеристик. Как это делают, рассмотрим на примере двух первых из них (рис. 2.119):

$$h_{11Э} = \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_Б}; \quad h_{12Э} = \frac{u_{БЭ3} - u_{БЭ1}}{u_{КЭ3} - u_{КЭ1}}.$$

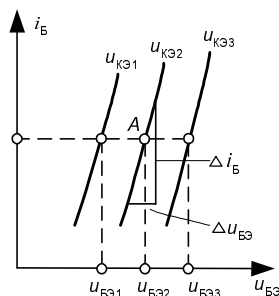


Рис. 2.119

Основываясь на уравнениях (11.6), можно построить схему замещения транзистора, называемую **малосигнальной**. Первое из этих уравнений — закон Кирхгофа для напряжений. Значит, имеется два двухполюсника, соединенных последовательно. Начертим этот фрагмент. Сразу же возникает вопрос о выборе направлений отсчета переменных. Запомните: **во всех случаях построения схем замещения направления отсчета следует выбирать точно так же, как они были выбраны при снятии исходных характеристик**. В данном случае — как на рис. 2.108, а. С учетом сказанного чертим схему (рис. 2.120).

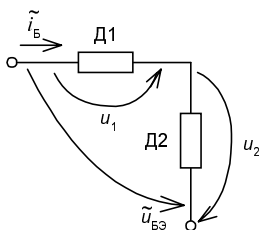


Рис. 2.120

Выясним, что представляют собой двухполюсники Д1 и Д2. Согласно верхнему уравнению в (11.6) $u_1 = h_{11Э} \tilde{i}_Б$. Это — не что иное, как закон Ома, и Д1 — резистивный элемент. Напряжение u_2 второго элемента не зависит от протекающего через него тока, но зато зависит от "чужого" напряжения. Следовательно, это — зависимый источник напряжения (рис. 2.121).

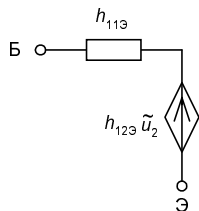


Рис. 2.121

Нижнее из уравнений (11.6) — закон Кирхгофа для токов. Ему соответствует схема, состоящая из двух двухполюсников, соединенных параллельно. Рассуждая аналогично, мы обнаружим, что первый из них — зависимый источник тока, а второй — резистивный элемент с проводимостью $h_{21э}$. Таким образом, малосигнальная схема замещения транзистора, соответствующая уравнениям (11.6), имеет вид, показанный на рис. 2.122.

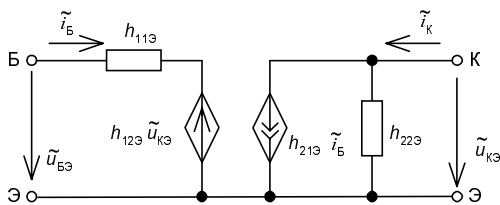


Рис. 2.122

Такую же малосигнальную схему замещения можно получить из полносигнальной (см. рис. 2.115), если воспользоваться правилами, сформулированными в п. 9.5 и уяснить, что вентили не нужны, поскольку переменные изменяются далеко от тех мест характеристик, которые замещают углами (см. рис. 2.118). Эта схема показана на рис. 2.123. Как видим, по конфигурации и компонентному составу она совпадает со схемой на рис. 2.122. Отличие ее состоит лишь в том, что по-разному определены параметры, ввиду чего несколько различаются их значения.

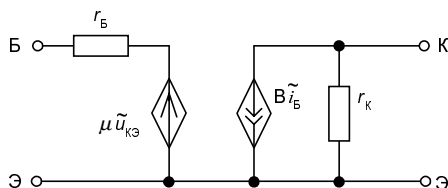


Рис. 2.123

Аналогично определяют дифференциальные параметры для характеристик, снятых при включении с общей базой. В их обозначениях вместо буквы "Э" используют букву "Б": $h_{11Б}$, $h_{12Б}$, $h_{21Б}$, $h_{22Б}$. Если в качестве "аргументов" выбирают пару переменных $\{u_1, u_2\}$, малосигнальными служат так называемые u -параметры ("игрек-параметры"):

$$\begin{aligned} i_1 = \varphi_1(u_1, u_2) &\Rightarrow y_{11} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial u_1}; \quad y_{12} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial u_2}; \\ i_2 = \varphi_2(u_1, u_2) &\Rightarrow y_{21} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial u_1}; \quad y_{22} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial u_2}. \end{aligned}$$

Если в качестве "аргументов" берут пару переменных $\{i_1, i_2\}$ малосигнальными являются z -параметры ("зет-параметры"):

$$\begin{aligned} u_1 = \psi_1(i_1, i_2) &\Rightarrow z_{11} = \frac{\partial \psi_1}{\partial i_1}; \quad z_{12} = \frac{\partial \psi_1}{\partial i_2}; \\ u_2 = \psi_2(i_1, i_2) &\Rightarrow z_{21} = \frac{\partial \psi_2}{\partial i_1}; \quad z_{22} = \frac{\partial \psi_2}{\partial i_2}. \end{aligned}$$

Так как все четверки параметров характеризуют один и тот же объект, они однозначно связаны между собой, т. е. выражаются друг через друга по определенным формулам.

11.5. Зависимые двухполюсники

Строя схемы замещения транзистора, нам пришлось ввести два новых идеальных элемента — источник тока, управляемый током, $i_{\Gamma} = \beta i_{\text{Б}}$ и источник напряжения, управляемый напряжением ($u_{\text{Б зав}} = \mu u_{\text{КЭ}}$). Наряду с ними используют источник тока, управляемый напряжением и источник напряжения, управляемый током.

Кроме того, может появиться потребность и в других зависимых элементах (см. п. 9.2). Так, схема замещения фотодиода (см. рис. 2.21) должна содержать источник тока, управляемый освещенностью. Схема замещения фоторезистора — резистивный элемент, управляемый освещенностью, а схема замещения терморезистора — резистивный элемент, управляемый температурой.

11.6. Семейства характеристик транзистора, снятые при включении по схеме с ОБ

Семейства характеристик транзистора, снятые при включении с общим эмиттером, и соответствующие h -параметры полностью описывают его статические свойства. Поэтому, пользуясь ими, в принципе, можно решить любую задачу. Однако для анализа схем, где транзистор включен с общей базой, удобнее применять характеристики, снятые при такой же схеме его

включения (см. рис. 2.108). Они показаны на рис. 2.124. Крутизна наклона пологих участков выходных характеристик у них в B раз меньше, чем характеристик, снятых при включении с ОЭ. Их удаленность от оси абсцисс пропорциональна току эмиттера, коэффициент передачи которого (α) чуть меньше единицы:

$$\alpha = \frac{B}{B+1}. \quad (11.7)$$

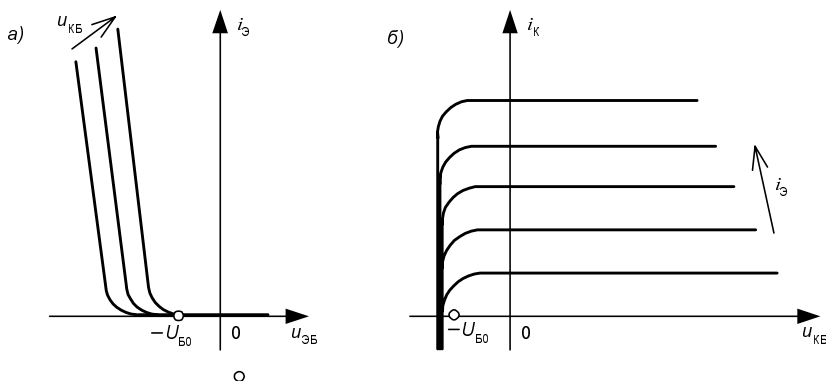


Рис. 2.124

Крутые участки выходных характеристик лежат левее оси тока примерно на 0,7 В.

11.7. Построение выходной характеристики транзистора

Выходные характеристики транзистора соответствуют отдельным (дискретным) значениям тока базы или эмиттера. Очевидно, в большинстве конкретных случаев анализа транзисторных цепей вычисленное значение входного тока не совпадет ни с одним из этих дискретных значений. Более того, нередко в справочнике характеристики вообще не приведены. Как же в этих случаях построить выходную характеристику транзистора?

Если семейство выходных характеристик имеется, используют графическую интерполяцию. Проще всего понять смысл этой процедуры на примере. Допустим, найденное значение тока базы оказалось равным 47 мкА. А выходные характеристики имеются для токов 40 и 50 мкА (рис. 2.125). Поступаем так: делим расстояние между характеристиками на 10 равных частей и через седьмую отметку проводим "на глаз" искомую характеристику (штриховая линия на рис. 2.125).

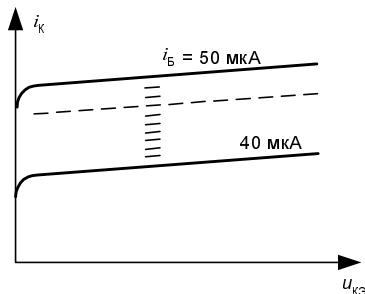


Рис. 2.125

Если семейство выходных характеристик отсутствует, находим в справочных данных значение $h_{12Э}$ и принимаем, что $B = h_{12Э}$. Вычисляем $i_{\Gamma} = Bi_{\text{Б}}$ и строим прямоугольную аппроксимацию выходной характеристики. Если необходимо учесть ее наклон, пользуемся формулой (11.1) в п. 11.2.

Выходные характеристики для включения транзистора с общей базой строить еще легче, т. к. коэффициент передачи тока эмиттера α почти равен единице. Поэтому можно считать, что $i_{\Gamma} = i_{\text{Э}}$. Крутизна наклона этих характеристик в B раз меньше, чем крутизна наклона характеристик, снятых при включении с ОЭ. Так что их можно проводить горизонтально. Надо только помнить, что эти характеристики заходят во второй квадрант (см. рис. 2.124).

11.8. Поведение транзистора в динамическом режиме

1. Поскольку между слоями транзистора и его выводами существуют переменные электрические поля, как и во всех подобных случаях в схему замещения вводят емкостные элементы ("паразитные емкости") $C_{\text{БЭ}}$, $C_{\text{БК}}$ и $C_{\text{КЭ}}$.
2. Кроме того, в транзисторе существует еще один механизм задержки распространения сигнала, обусловленный тем, что электроны, инжектированные из эмиттера в базу, движутся к коллектору, во-первых, с конечной (не бесконечно-большой) скоростью и, во-вторых, скорости их движения различны. Это приводит к запаздыванию появления и немгновенному нарастанию коллекторного тока. Временные диаграммы эмиттерного тока в виде "скачка" и вызванного им коллекторного тока показаны на рис. 2.126. Кривая коллекторного тока удовлетворительно описывается функцией:

$$i_{\text{К}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_3; \\ \alpha I_{\text{Э}} (1 - e^{-(t-t_3)/\tau_{\alpha}}). \end{cases} \quad (11.8)$$

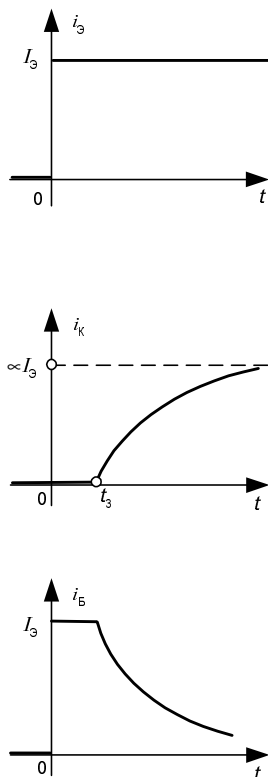


Рис. 2.126

Параметр τ_α называют **постоянной времени коэффициента передачи тока эмиттера**. У транзисторов интегральных микросхем $\tau_\alpha \approx 10^{-10}$ с. Значение t_3 пропорционально τ_α , а именно: $t_3 = \xi \tau_\alpha$, причем ξ немного меньше единицы.

Замечание

На рис. 2.126 показана временная диаграмма тока базы

$$i_б(t) = i_э(t) - i_к(t).$$

Из сопоставления ее с временной диаграммой $i_к(t)$ следует, что ток коллектора определяется зарядом базы.

Иногда можно прочесть, что выходной ток электронной лампы и полевого транзистора управляется входным напряжением, а биполярного транзистора — входным током. Верным это утверждение станет, если заменить глагол "управляется" выражением "поддерживается постоянным". Когда говорят об управле-

нии, то имеют в виду не столько поддержание постоянным, сколько изменение. Изменяется же входной ток во всех трех случаях путем изменения электрического заряда: в лампе — управляющей сетки, в полевом транзисторе — затвора, а в биполярном транзисторе — базы.

Формулу (11.8) можно использовать для получения операторного коэффициента передачи тока эмиттера $\hat{\alpha}(p)$ (см. п. 10.5). Оригинал $1 - e^{-at}$ соответствует изображение $\frac{\alpha}{p + \alpha}$ (см. строку 4 в табл. 2.1), а сдвигу во времени вправо на величину t_3 — множитель $-e^{-pt_3}$. Поэтому зависимость (11.8), выраженная в операторной форме, имеет вид:

$$\hat{i}_K(p) = \frac{\alpha e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_\alpha} I_\Xi.$$

Если вместо I_Ξ подставить изображение другого оригинала, мы получим универсальную формулу, пригодную для отображения реакции транзистора на воздействие любой формы:

$$\hat{i}_K(p) = \frac{\alpha e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_\alpha} \hat{i}_\Xi(p).$$

Первый множитель в правой части этой формулы отражает свойства самого транзистора. Его можно обозначить одной буквой:

$$\hat{\alpha}(p) = \frac{\alpha e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_\alpha}. \quad (11.9)$$

Чаще всего транзисторы используют при включении с общим эмиттером. Поэтому интересно получить выражение для операторного коэффициента передачи тока базы $\hat{B}(p)$. Воспользуемся связью величин α и B (11.7):

$$\alpha = \frac{B}{B + 1}.$$

Подставим сюда выражение (11.9):

$$\hat{B}(p) = \frac{\frac{\alpha e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_\alpha}}{1 - \frac{\alpha e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_\alpha}}. \quad (11.10)$$

и выполним следующие алгебраические преобразования:

1. Умножим числитель и знаменатель на $(1 + p\tau_\alpha)$.
2. В знаменателе разложим показательную функцию в ряд и ограничимся в нем двумя первыми членами разложения.

3. Поделим числитель и знаменатель на $(1 - \alpha)$:

$$\hat{B}(p) = \frac{\frac{\alpha}{1-\alpha} e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_\alpha \left(\frac{1}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} \xi \right)}.$$

Воспользуемся формулой (11.10). Так как $\alpha \approx 1$, первый член в скобках можно считать равным B :

$$\hat{B}(p) = \frac{B e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 - p(1+\xi)B\tau_\alpha}.$$

Обозначим

$$\tau_B = (1+\xi)B\tau_\alpha \quad (11.11)$$

и назовем эту величину **постоянной времени коэффициента передачи тока базы**. Окончательно получим:

$$\hat{B}(p) = \frac{B e^{-p\xi\tau_\alpha}}{1 + p\tau_B}. \quad (11.12)$$

Так как $\xi\tau_\alpha \ll \tau_B$, обычно можно пренебречь задержкой и тогда выражение упростится:

$$\hat{B}(p) = \frac{B}{1 + p\tau_B}. \quad (11.13)$$

При усилении почти гармонических сигналов, пока их период значительно превосходит τ_B при включении транзистора с общим эмиттером или τ_α (при включении с общей базой) коэффициенты передачи тока и напряжения усилительных каскадов практически не зависят от частоты. Но при приближении периода к этим значениям модули коэффициентов передачи уменьшаются, т. к. изменение коллекторного тока не успевает отслеживать изменение тока базы или тока эмиттера соответственно.

11.9. Униполярные (полевые) транзисторы

Принцип действия униполярного транзистора основан на том, что концентрация носителей в очень тонком слое полупроводника зависит от напряженности электрического поля, перпендикулярного этому слою. На рис. 2.127 показана в разрезе структура, служащая основой униполярного транзистора. Области типа n в подложке типа p соединены тонким слоем с проводимостью типа n , именуемым **каналом**. По нему может протекать ток. Область типа n , из которой электроны втекают в канал, называют **истоком**, область, куда они поступают из канала, — **стоком**. Если создать перпендикулярное электрическое поле, обозначенное на рисунке вертикальными стрелками, то

в зависимости от его знака концентрация электронов в канале будет либо расти, либо убывать. Соответственно сила тока между областями типа n будет либо увеличиваться, либо уменьшаться. Поле создают, подключая источник сигнала между подложкой и проводящей пленкой, расположенной над каналом, называемой **затвором**. Затвором может служить либо слой полупроводника типа p (рис. 2.128, *а*), либо металлическая пленка M , изолированная от канала слоем окисла кремния O (рис. 2.128, *б*).

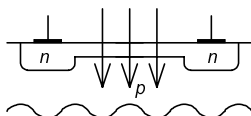


Рис. 2.127

Замечание

Знаками "+" обозначены сильно легированные области (*легированием* называют процесс внедрения атомов примеси в полупроводник).

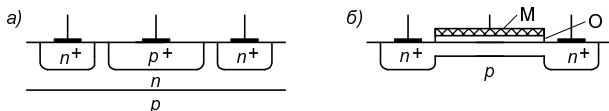


Рис. 2.128

В первом случае говорят, что в транзисторе имеется "управляющий p - n -переход", во втором — "изолированный затвор". Обычно вторую структуру называют "МОП-транзистором" (Металл-Окисел-Полупроводник).

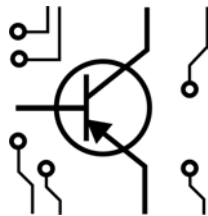
Известны МОП-транзисторы двух типов — "с встроенным каналом" (как на рис. 2.128, *б*) и "с индуцируемым каналом". В транзисторе второго типа канал при изготовлении не формируется и, следовательно, в отсутствие управляющего поля проводимость между областями типа n практически равна нулю. Канал появляется (индуцируется) при определенном значении напряжения между затвором и подложкой, именуемом "пороговым").

Замечание

Авторы ГОСТ 2.730—73 присвоили МОП-транзисторам неправильно ориентирующие названия: первым — "обедненный тип", вторым — "обогащенный тип".

Кроме транзисторов с каналом типа n изготавливают транзисторы с каналом типа p .

ГЛАВА 3



Количественные аспекты

§ 12. Общие соображения

В "точных" науках полностью разделить качественные и количественные аспекты невозможно (слово "точный" означает применение математических методов). Они всегда сопутствуют друг другу. Однако многие важные понятия можно ввести, почти не обращаясь к математическим выкладкам, что и было сделано в *главе 1*. В предстоящем изложении роль количественного анализа значительно возрастает, и он применяется не только для вычислений, но и для выявления новых качественных особенностей.

12.1. Аналоговые и цифровые элементы

Уже несколько десятилетий транзисторные цепи и их элементы принято делить на **аналоговые** и **цифровые**. Происходят эти термины от названий "аналоговая вычислительная машина" (АВМ) и "цифровая вычислительная машина" (ЦВМ). Однако используются аналоговые и цифровые элементы не только в вычислительных машинах, но и в других устройствах.

Замечание

Во множество аналоговых элементов включают также все другие нецифровые устройства, например, мультивибратор, одновибратор, триггер Шмитта. По-видимому, лучше было бы выделить их в самостоятельный класс.

Интенсивность сигнала, как правило, оценивают напряжением, а не силой тока (хотя эти переменные абсолютно равноправны). Обусловлен данный выбор чисто практическими соображениями: для измерения напряжения вольтметр или осциллограф подключают параллельно, не нарушая целостности цепи.

Напряжение *и* выходного сигнала любого транзисторного устройства (рис. 3.1) может изменяться в некоторых пределах с одной стороны или по обе стороны от нуля (рис. 3.2).

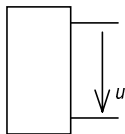


Рис. 3.1

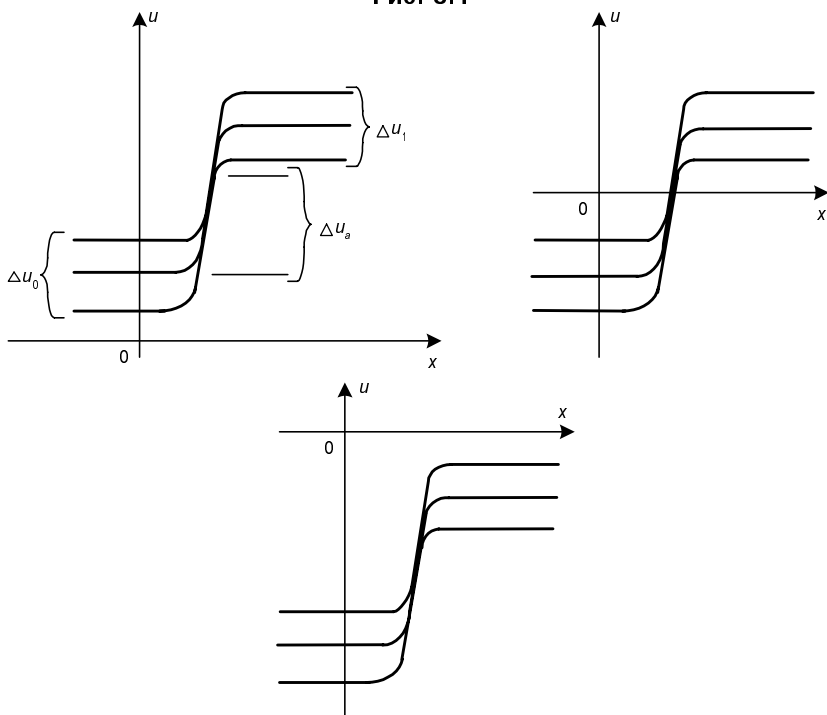


Рис. 3.2

Величиной x на этих графиках может быть время или электрическая переменная — напряжение, сила тока и т. п. В аналоговых элементах используют сигналы, напряжение которых непрерывно изменяется в пределах участка Δu_a . В цифровых же элементах этот диапазон, напротив, является нерабочим, а в качестве рабочих используют участки (поддиапазоны) Δu_0 или Δu_1 (см. рис. 3.2). Именно сигналами с такими уровнями напряжения вещественно воспроизводят значения логической переменной — 0 и 1.

Понятия и методы теории электрических цепей одинаково пригодны для исследования работы элементов обоих типов. Это позволяет изучать в определенных пределах свойства аналоговых и цифровых элементов совместно. Вместе с тем имеются и существенные различия. В цифровых элементах транзисторы работают в режиме переключения или близком к нему. Поэтому при теоретическом анализе развития процессов во времени в качестве воздействующего стандартного сигнала обычно используют функцию Хеви-

сайда или функцию Дирака (см. п. 5.10). Аналоговые же элементы работают в режиме малого сигнала (в активной области). Поэтому для их теоретического анализа в качестве воздействующего сигнала наиболее подходит гармоническая функция. Представляется, что вводить ее в рассмотрение целесообразно при изучении аналоговых элементов, а не заранее. Поэтому в главе 2 элементы теории переменных токов не рассмотрены.

В настоящее время имеются прикладные программы, позволяющие численно решить почти любую задачу. Однако их применение вряд ли может способствовать формированию в сознании учащихся и специалистов предметной модели мира — для этого надо развивать образное мышление (см. п. 3.11). Поэтому "ручной" анализ, позволяющий быстро получить качественный результат, количественно менее точный, чем в случае применения компьютера, остается необходимым элементом обучения и профессиональной деятельности инженера.

12.2. Подход к анализу статического режима

Часто усилитель — как многокаскадный, так и однокаскадный, а также усилительный каскад — является трехполюсником (рис. 3.3). Поэтому его поведение в статическом режиме, как и поведение любого трехполюсника описывают системой, состоящей из двух уравнений. Так как интенсивность сигнала обычно оценивают напряжением, в качестве "аргументов" часто используют входное и выходное напряжения:

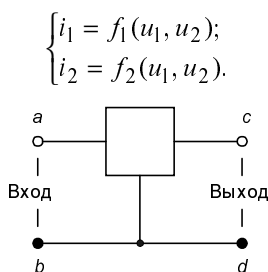


Рис. 3.3

Для режима малого сигнала принимают линейные соотношения:

$$\begin{cases} \tilde{i}_1 = \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \tilde{u}_1 + \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \tilde{u}_2; \\ \tilde{i}_2 = \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \tilde{u}_1 + \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \tilde{u}_2. \end{cases}$$

Каждому из этих уравнений соответствует двухполюсник, содержащий соединенные параллельно зависимый источник тока и резистивный элемент. Однако психологически "уютнее" (привычнее) двухполюсник, состоящий из

последовательно соединенных источника напряжения и резистивного элемента. Произведя преобразования (см. теорему 6 в п. 9.8), получим малосигнальную схему замещения усилителя (рис. 3.4).

Усилитель, очевидно, надо изучать совместно с источником сигнала и нагрузкой (рис. 3.5).

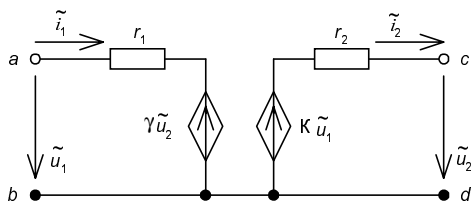


Рис. 3.4

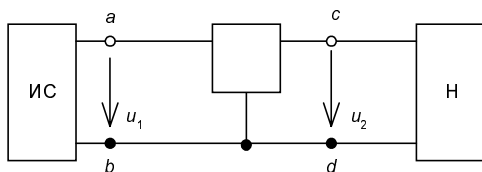


Рис. 3.5

По отношению к источнику сигнала все, что правее точек a и b , является двухполюсником (ДВ1 на рис. 3.6, a). Важно понимать, что на параметры этого двухполюсника влияют не только параметры самого усилителя, но и параметры нагрузки: напряжение u_2 (см. рис. 3.5) зависит от характеристики нагрузки. Но это напряжение в свою очередь определяет напряжение зависимого источника γu_2 (см. рис. 3.4). Аналогично по отношению к нагрузке все, что левее точек c и d , (см. рис. 3.5), тоже является двухполюсником (ДВ2 на рис. 3.6, b). И на его параметры влияют параметры источника сигнала.

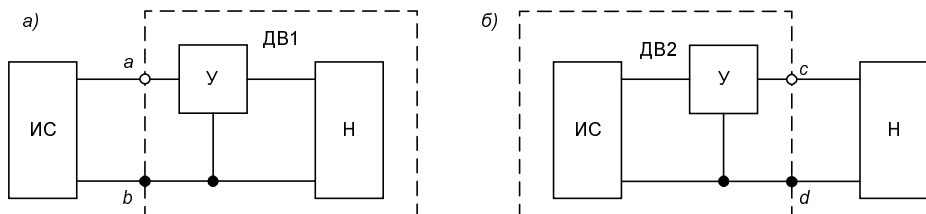


Рис. 3.6

В некоторых случаях полезно схему, показанную на рис. 3.5, мыслить как структуру, представленную на рис. 3.7 (штриховыми стрелками условно обозначено описанное выше влияние).

Достаточно очевидно, что для анализа надо знать схемы источника сигнала, самого усилительного каскада и нагрузки. Они весьма разнообразны. Источником сигнала может служить как элемент, не являющийся усилительным каскадом (УК) (например, микрофон, головка воспроизведения в магнитофоне), так и — в многокаскадном усилителе — предыдущий УК. Нагрузкой может быть, например, громкоговоритель, а может — вход следующего УК. В связи с этим возникает вопрос: возможен ли анализ в общем виде? Оказывается, да, если применить удачные абстракции.

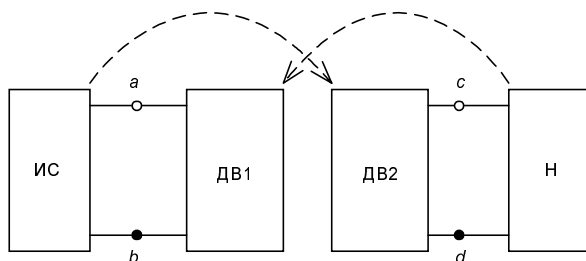


Рис. 3.7

Ранее мы убедились в пригодности кусочно-линейной аппроксимации ВАХ существенно нелинейных элементов. Каждый участок такой аппроксимации — отрезок прямой. Ему соответствуют эквивалентные друг другу схемы, показанные на рис. 3.8 (см. теорему 6 в п. 9.8). Значит, источник сигнала и нагрузка могут быть замещены любой из них (надо только не забывать о границах каждого линейного участка). Усилительный каскад содержит, кроме транзистора и источника питания, вспомогательные элементы. Большею частью это — резисторы и иногда дополнительные источники питания. Пользуясь теоремой Тевенина—Нортона, их можно объединить с элементами схем замещения источника сигнала и нагрузки, т. е. прийти к тем же схемам замещения (см. рис. 3.8). Это позволяет получить некоторые важные результаты в общей форме.

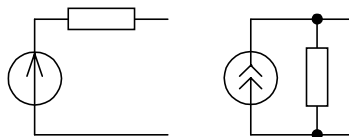


Рис. 3.8

§ 13. Статический режим усилительного каскада с ОЭ

Наиболее простым и одним из распространенных транзисторных элементов является усилительный каскад параллельного типа на транзисторе, включенном с общим эмиттером (УК с ОЭ).

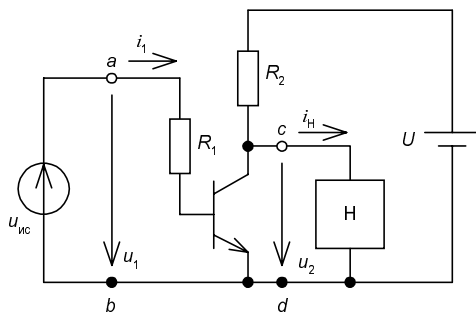


Рис. 3.9

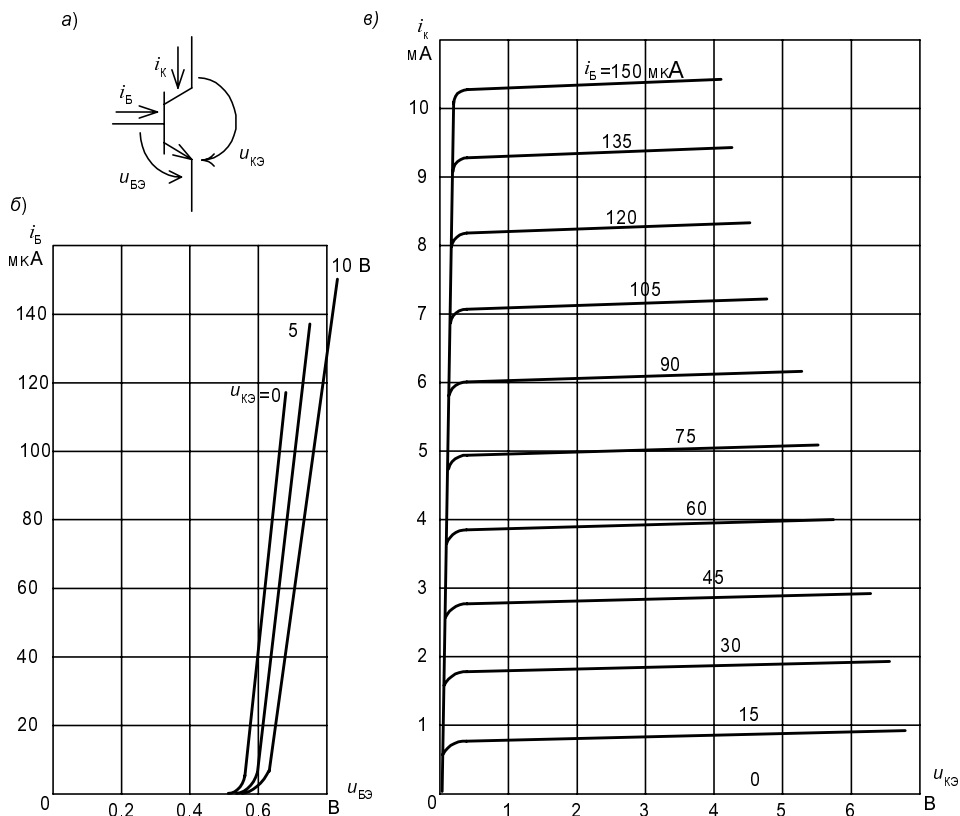


Рис. 3.10

Его схема с абстрактным источником сигнала и нагрузкой показана на рис. 3.9. В соответствии с соображениями, изложенными в предыдущем параграфе, резистивный элемент R_1 может включать в себя "внутреннее сопротивление" источника сигнала и резистивный элемент, замещающий вспомо-

гательный резистор в УК (см., например, рис. 1.30, а). Для определенности входом УК будем считать точки a и b (см. рис. 3.9).

В инженерной практике количественный анализ никогда не завершается получением формул. Поэтому и мы рассмотрим пример с правдоподобными числовыми данными: напряжение источника питания $U = 5$ В; $R_1 = 15$ кОм; $R_2 = 0,75$ кОм; напряжение $u_{ис}$ источника сигнала изменяется в пределах $0 \dots 5$ В. Семейства характеристик транзистора показаны на рис. 3.10.

Чтобы начать учиться количественному анализу, решим сначала простейшую задачу: нагрузка отсутствует (вместо нее — разрыв).

13.1. Ожидаемый вид ХПН

Найдем характеристику передачи напряжения (ХПН) усилительного каскада — зависимость u_2 от u_1 . Сначала представим себе, как она должна выглядеть, просто рассуждая (см. рис. 3.9). Начнем с $u_{ис} = 0$. Источнику напряжения, напряжение которого равно нулю, эквивалентна короткая. Следовательно, база транзистора соединена резистором $R1$ с его эмиттером. В этом контуре источник напряжения отсутствует и, следовательно, ток базы равен нулю (током $I_{к0}$ мы пренебрегаем). Значит, транзистор заперт, т. е. его выход — промежуток коллектор-эмиттер эквивалентен разрыву.

Замечание

Встречая слова *заперт* и *замкнут*, будьте осторожны. В обывденной речи это — синонимы. Но в описании транзисторных цепей ситуация совсем иная. Выражение "транзистор заперт" означает, что он закрыт, не проводит, т. е. коллекторный ток равен нулю. Термин же "цепь замкнута" означает, что в ней нет разрыва — создан путь для тока.

Как мы договорились, нагрузка отсутствует, т. е. вместо нее тоже разрыв. Значит, через резистор $R2$ ток не течет, и напряжение между его выводами равно нулю. Согласно второму закону Кирхгофа напряжение u_2 равно разности U и напряжения на резисторе $R2$. Поскольку второе равно нулю, то $u_2 = U$.

Если напряжение $u_{ис}$ увеличивать, то при $u_1 = u_{ис} = 0,5$ В появится и начнет расти ток базы, а вместе с ним ток коллектора и равный ему ток резистора $R2$. Следовательно, напряжение между его выводами тоже начнет расти, а напряжение u_2 — уменьшаться, т. к. их сумма постоянна (равна U). Для дальнейших рассуждений элементарных знаний недостаточно. Поэтому приступим к более точному анализу.

13.2. Построение ХПН графическим методом

Как всегда, начнем рассуждать от искомого, т. е. напряжения u_2 . Чтобы его найти, надо рассмотреть выходной контур УК (рис. 3.11).

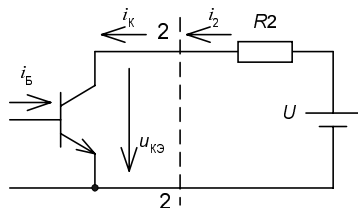


Рис. 3.11

Используем известный уже нам графический метод решения (см. п. 9.4). Делим контур на два двухполюсника по линии 2-2 и на семействе выходных характеристик транзистора чертим характеристику двухполюсника $\{U; R2\}$ (рис. 3.12, а). Уже из этого построения ясно, что по мере роста тока базы i_B напряжение u_2 уменьшается до значения, близкого к нулю. Начиная с $i_B \approx 100$ мкА (точка 8) все точки пересечения характеристик лежат на крутых участках выходных характеристик транзистора.

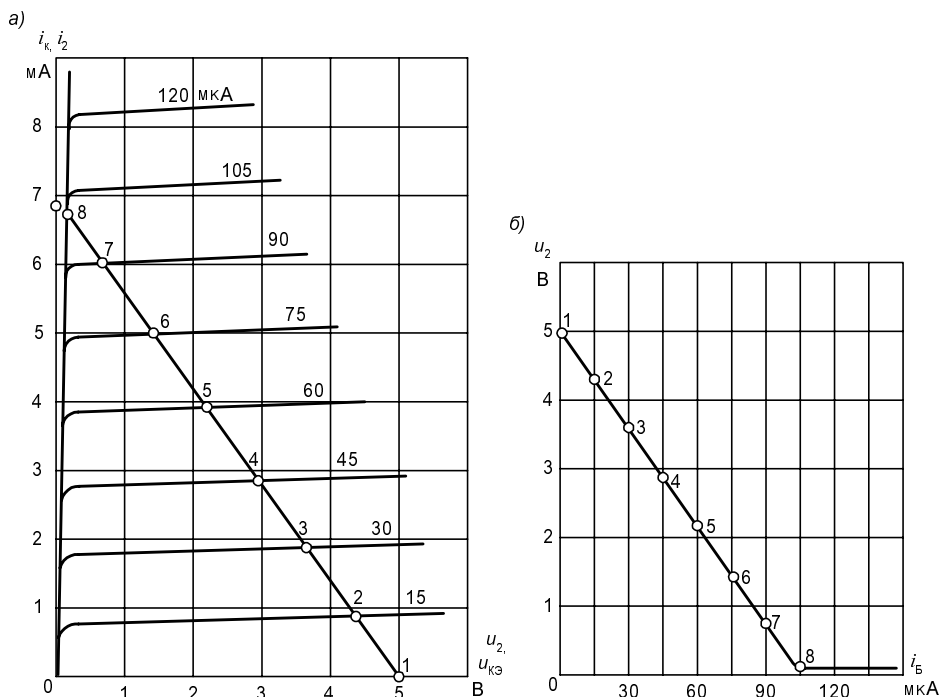


Рис. 3.12

Построим зависимость u_2 от i_B (рис. 3.12, б). Но нас интересует зависимость u_2 от u_1 . Следовательно, надо найти взаимосвязь между u_1 и i_B , рассмотрев входной контур (рис. 3.13).

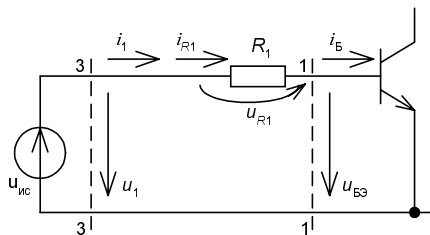


Рис. 3.13

Решим задачу, разделив контур по линии 1-1. Тут мы столкнемся с трудностью, обусловленной влиянием нагрузки на ДВТ (см. рис. 3.7). Эта трудность проявляется в зависимости входной характеристики транзистора от напряжения $u_{КЭ}$ (см. рис. 3.10). Получается, что мы не можем найти связь между $i_Б$ и $u_1 = u_{ис}$, если не знаем значение $u_{КЭ} = u_2$, но последнее невозможно получить, не зная $i_Б$. Однако зависимость $i_Б$ от $u_{КЭ}$ в свою очередь зависит от того, какова крутизна характеристики двухполюсника $\{u_{ис}; R_1\}$.

В одном случае (прямая 1 на рис. 3.14) эта зависимость сильная — и тогда надо графически решить систему уравнений, представленную на рис. 3.12, а и рис. 3.14 или воспользоваться методом последовательных приближений.

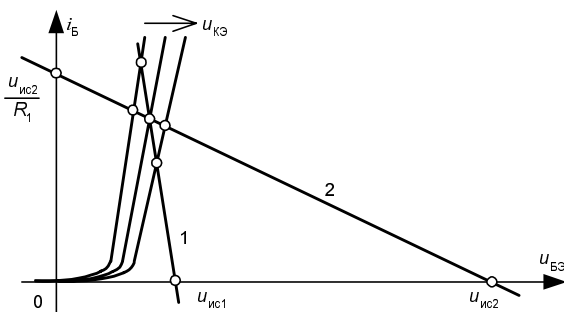


Рис. 3.14

В другом случае (прямая 2) этой зависимостью можно пренебречь, взяв "среднюю" входную характеристику. Тогда целесообразнее (потребуется меньше времени на решение) разделить анализируемую схему по линии 3-3 (см. рис. 3.13) и построить характеристику двухполюсника, состоящего из резистора R_1 и промежутка база-эмиттер транзистора, воспользовавшись вторым законом Кирхгофа $u_1 = u_{R1} + u_{БЭ}$. Для этого потребуется складывать значения напряжений при одинаковых значениях токов (на рис. 3.15 показано получение одной точки для тока $i_Б + i_{Б0}$).

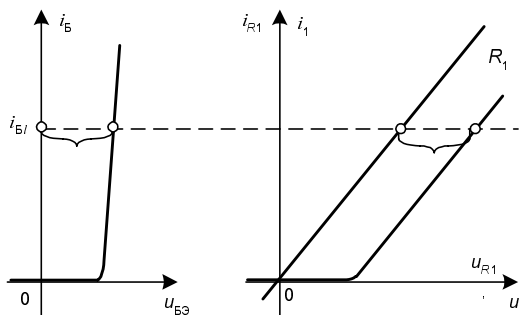


Рис. 3.15

Полностью зависимость $i_B(u_1)$ представлена на рис. 3.16.

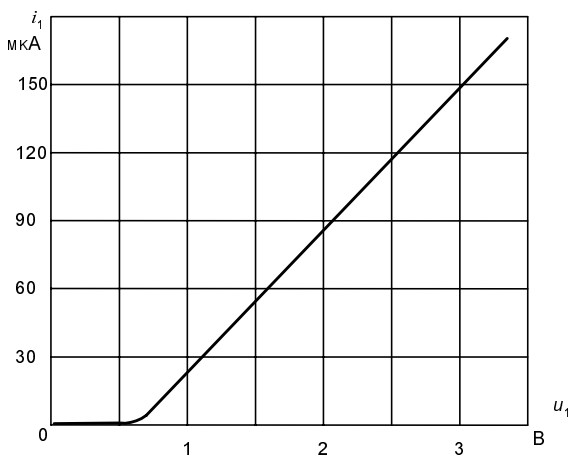


Рис. 3.16

По этой зависимости мы найдем все значения $u_{1\ell}$, соответствующие значениям $i_{B\ell}$, и построим искомую ХПН (рис. 3.17, а). Полезно одновременно начертить характеристику передачи напряжение-ток $i_k = i_k(u_1)$ (рис. 3.17, б), т. к. u_2 непосредственно связано с коллекторным током:

$$u_2 = U - R_2 i_k.$$

Замечание

Несколько функций одного аргумента целесообразно чертить "столбиком" — так, чтобы каждому значению аргумента соответствовала одна вертикальная линия — таким образом легче увидеть взаимосвязь между разными переменными.

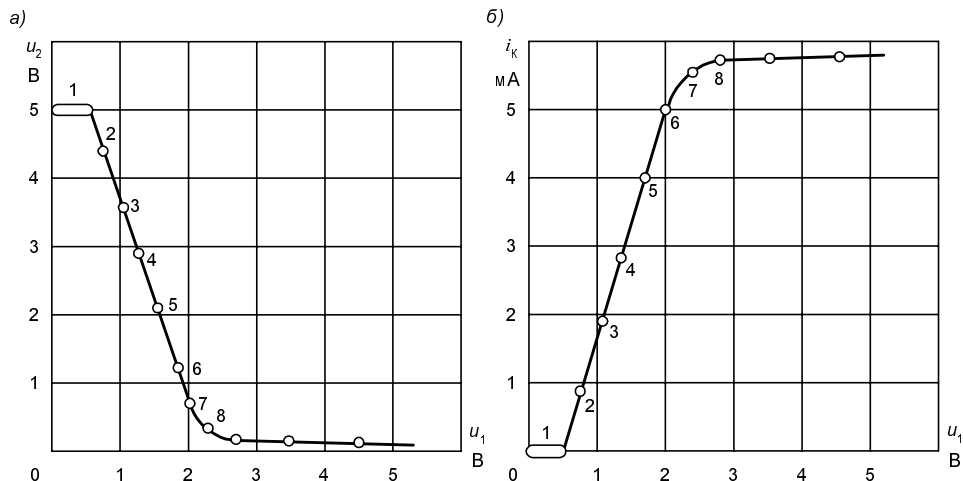


Рис. 3.17

Из сопоставления кривых отчетливо видна связь между u_2 и i_k , соответствующая последней формуле, особенно если представить, как движутся изображающие точки по этим кривым в случае постепенного увеличения напряжения $u_{ис}$, начиная от $u_{ис} = 0$.

13.3. Области работы транзистора в усилительном каскаде

Полученные результаты можно использовать для введения понятий об областях работы транзистора в усилительном каскаде, применимых к любому способу его включения. На характеристике передачи напряжения (рис. 3.18) хорошо видны три области: в областях I и III выходное напряжение практически не зависит от входного напряжения, а в области II почти пропорционально ему:

$$\Delta u_2 \approx -K_u \Delta u_1,$$

где $K_u = \left| \frac{du_2}{du_1} \right|$ — коэффициент передачи напряжения.

Первую область называют **областью отсечки**, вторую — **активной областью**, третью — **областью насыщения**. В области I транзистор подобен выключателю, контакты которого разомкнуты (при этом $u_2 = U$), а в области III — выключателю, контакты которого замкнуты (при этом $u_2 \approx 0$). Важнейшее преимущество транзистора перед выключателем — наличие области II, где его выходной ток (и, следовательно, ток и напряжение нагрузки) плавно изменяется. Это — одно из обстоятельств, делающее транзистор незаменимым управляющим элементом.

Граница между областями I и II ($u_1 = U_{B0}$) определяется входными характеристиками транзистора. При $u_1 < U_{B0}$ транзистор заперт (не проводит).

У наиболее распространенных — кремниевых — транзисторов при комнатной температуре $U_{B0} \approx 0,5$ В (см. рис. 3.10, а). Граница между областями II и III определяется параметрами всех трех компонентов выходного контура — транзистора, источника питания и резистора R_2 . В области насыщения изображающая точка находится на крутом участке выходной характеристики транзистора (например, точка 8 на рис. 3.12). Напряжение $u_2 = u_{КЭ}$ при этом близко к нулю (0,1...0,2 В), благодаря чему значение коллекторного тока насыщения $I_{КН}$ определяется напряжением U источника питания и сопротивлением R_2 , т. е. почти равно току короткого замыкания $I_{КЗ2}$ выходного двухполюсника:

$$I_{КН} \approx I_{КЗ2} = \frac{U}{R_2}.$$

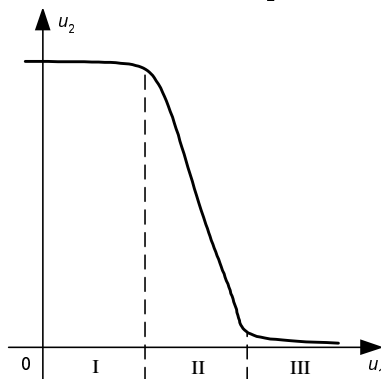


Рис. 3.18

Такой режим работы УК, когда переменные изменяются только в пределах активной области, называют **режимом малого сигнала**. Если изображающая точка заходит в области I или III, режим называют **режимом большого сигнала**. Режим большого сигнала, отличающийся тем, что изображающая точка проходит через все три области, называют **режимом переключения** (так как в этом случае транзистор работает подобно выключателю). Режим малого сигнала используют в аналоговых элементах, а режим большого сигнала (в том числе режим переключения) — в цифровых.

13.4. Характеристика передачи напряжения нагруженного усилительного каскада

В зависимости от характера нагрузки эту задачу разумно решать по-разному. Часто нагрузкой рассматриваемого УК служит такой же усилительный каскад или несколько одинаковых УК, входы которых соединены параллельно (рис. 3.19).

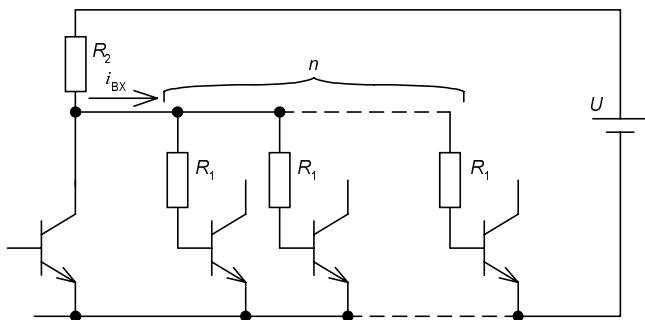


Рис. 3.19

Входную характеристику одного УК мы уже получили (см. рис. 3.16). Характеристику нескольких одинаковых параллельно включенных входов найдем, сложив ординаты (значения токов) при равных напряжениях. Поскольку приемные УК одинаковы, операцию сложения можно заменить умножением всех ординат на число приемных УК. Заменяем реальную входную характеристику ее кусочно-линейной аппроксимацией (рис. 3.20, а) и построим соответствующую ей схему замещения (рис. 3.20, б). Сопротивление нагрузки R_H равно R_1 в случае одного нагружающего УК и R_1/n — в случае n параллельно включенных входов. Представим себе, как изменится ХПН в результате подключения нагрузки.

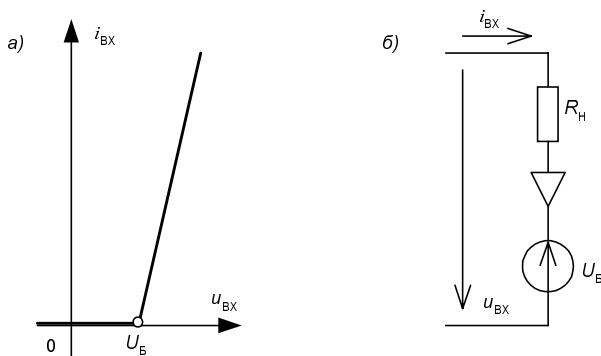


Рис. 3.20

Очевидно, легче всего понять что произойдет с областями отсечки и насыщения. В области отсечки промежуток коллектор-эмиттер транзистора может быть заменен разрывом (рис. 3.21, а), а в области насыщения — короткой (рис. 3.21, б).

Найдем u_2 для случая отсечки:

$$\begin{aligned}
 u_2 &= U - u_{R_2} \\
 u_{R_2} &= R_2 i \\
 i &= \frac{U - U_B}{R_2 + R_H} \\
 u_{R_2} &= \frac{R_2 (U - U_B)}{R_2 + R_H} \\
 u_2 &= U - \frac{R_2 (U - U_B)}{R_2 + R_H}
 \end{aligned}$$

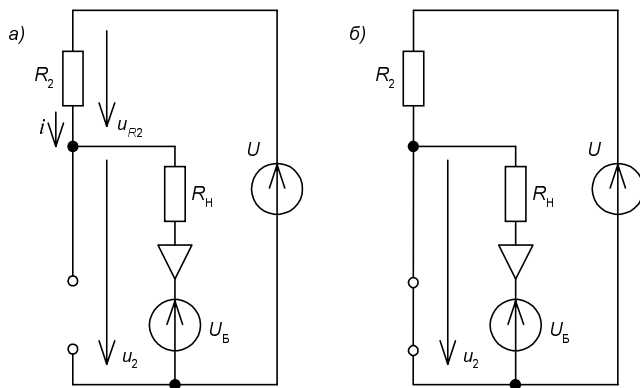


Рис. 3.21

Закоротка же доминирует над всеми элементами, присоединенными к ней параллельно. Поэтому в области насыщения $u_2 = 0$ независимо от характера нагрузки.

Полученные результаты для $u_2 = u_{КЭ}$ показаны на рис. 3.22, а. Логично предположить, что в активной области выходное напряжение будет изменяться подобно тому, как в случае ненагруженного УК (рис. 3.22, б).

Такое простое рассуждение не позволяет, однако, решить задачу, если имеется произвольная нелинейная нагрузка. В этом случае необходимо воспользоваться формальным методом. Найдем семейство выходных характеристик усилительного каскада

$$i_2 = i_2(u_1, u_2),$$

рассматривая его в целом как трехполюсник (рис. 3.23).

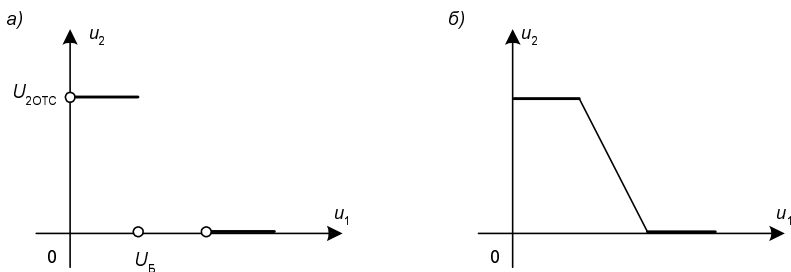


Рис. 3.22

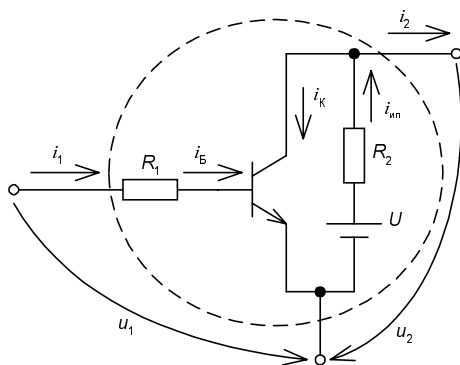


Рис. 3.23

Согласно первому закону Кирхгофа

$$i_2 = i_{ин} - i_K. \quad (13.1)$$

Поэтому, чтобы найти зависимость i_2 от u_1 и u_2 , надо знать зависимость i_K от u_1 . Найти ее легко, т. к. мы знаем зависимости $i_K(i_B, u_{КЭ})$ (см. рис. 3.10) и $i_B(u_1)$ (см. рис. 3.16). Это — чисто чертежная операция, приводящая к результату, представленному на рис. 3.24, а. Теперь согласно уравнению (13.1) из ординат прямой, являющейся характеристикой двухполюсника $\{U, R_2\}$, проходящей через точки (5; 0) и (0; 6,7) (см. рис. 3.12, а), надо вычесть ординаты всех кривых только что полученного семейства характеристик. Это — тоже чисто чертежная процедура. Ее результат представлен на рис. 3.24, б. Теперь, зная ВАХ нагрузки, легко решить задачу графическим методом, найдя точки ее пересечения с характеристиками на рис. 3.24, б.

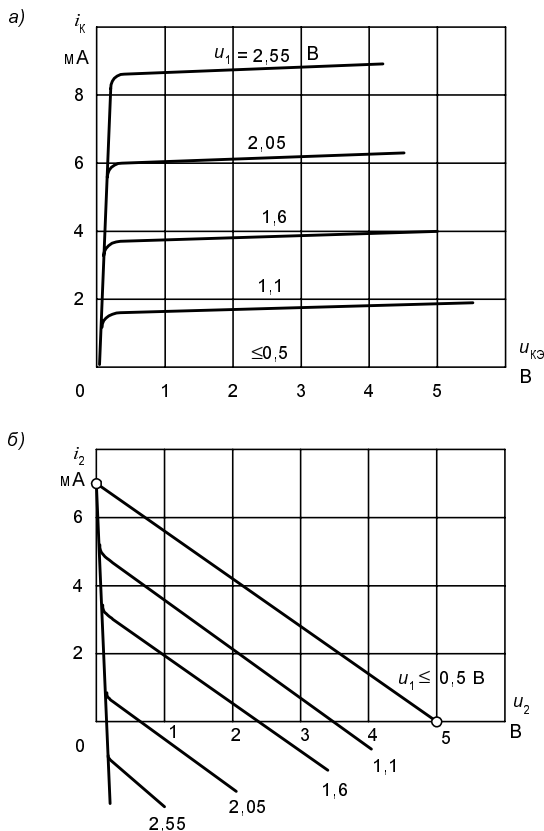


Рис. 3.24

13.5. Анализ схем замещения, содержащих вентили

В ряде случаев графический метод решения оказывается слишком громоздким даже при решении статических задач. Для анализа же переходных процессов он вообще неприменим. Поэтому необходимо уметь решать задачи аналитически, заменяя транзистор его схемой замещения. Чтобы начать учиться использовать этот метод, получим ХПН усилительного каскада с ОЭ, применив простейшую (четырёхкомпонентную) схему замещения транзистора, оставив в ней источник напряжения U_B , зависимый источник тока i_T и два вентили (рис. 3.25). Однако сразу же возникнет вопрос: как учитывать влияние вентиля. Займемся выработкой правил.

Вспомним: идеальный вентиль мы ввели для построения схем замещения существенно нелинейных элементов на основе кусочно-линейной аппрок-

симации их характеристик. Его условное графическое обозначение с направлениями отсчета напряжения и тока и ВАХ показаны на рис. 3.26. В буквенной форме ВАХ вентиля можно записать так:

$$\begin{cases} u_B = 0 & \text{при } i_B > 0; \\ i_B = 0 & \text{при } u_B > 0. \end{cases} \quad (13.2)$$

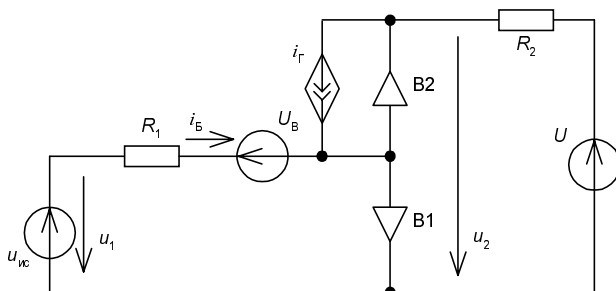


Рис. 3.25

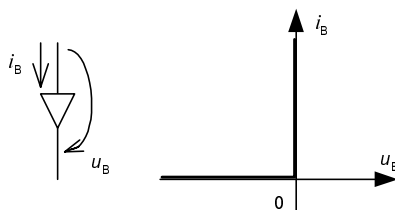


Рис. 3.26

Отсюда следует, что при выбранных направлениях отсчета напряжение вентиля не может быть положительным, а ток — отрицательным:

$$\begin{cases} u_B \leq 0; \\ i_B \geq 0. \end{cases} \quad (13.3)$$

Рассмотрим две простые задачи с вентилями, позволяющие осознать своеобразие их влияния путем сравнения со схемой без вентилях (рис. 3.27). Для каждой из трех схем найдем характеристики передачи напряжения.

1. Схема на рис. 3.27, а.

$$\begin{aligned} u_2 &= R_2 i \\ \downarrow \quad i &= \frac{u_1}{R_1 + R_2} \\ u_2 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1. \end{aligned}$$

График этой зависимости показан на рис. 3.28.

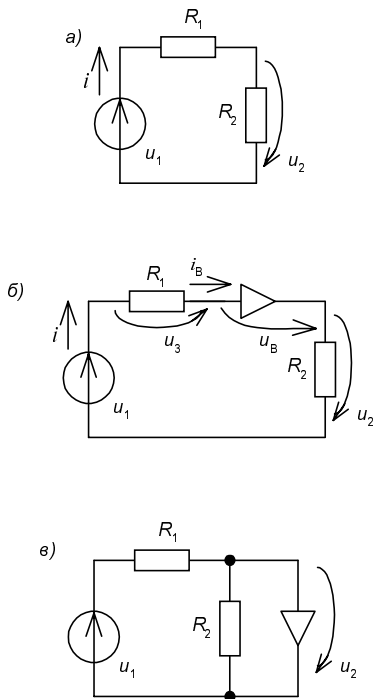


Рис. 3.27

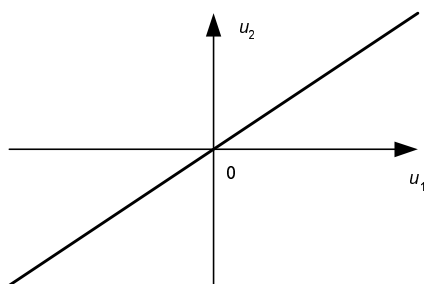


Рис. 3.28

2. Схема на рис. 3.27, б. Сравнив ее с предыдущей, мы увидим, что отличие одно — вентиль допускает протекание тока только в направлении хода часовой стрелки:

$$i = i_B \geq 0$$

(рис. 3.29, а). Поскольку, как и в предыдущем случае, $u_2 = R_2 i$, имеем

$$u_2 \geq 0$$

(рис. 3.29, б). Иными словами, теперь

$$u_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } u_1 < 0; \\ \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1 & \text{при } u_1 \geq 0. \end{cases}$$

Следовательно, новую ХПН можно рассматривать как откорректированную ХПН схемы без вентиля. Полезно представить себе также зависимость u_B от u_1 .

Судя по рис. 3.27, б видно (второй закон Кирхгофа), что

$$u_B = u_1 - u_3 - u_2.$$

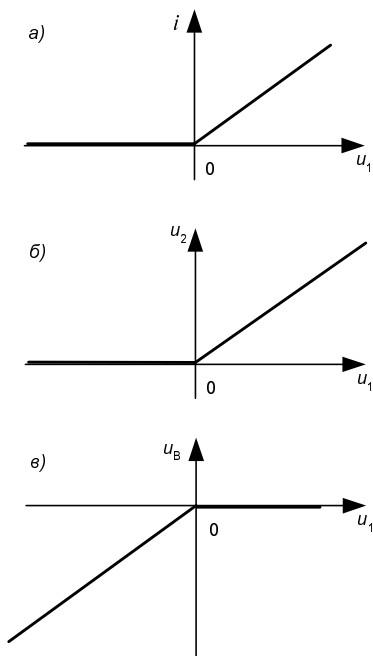


Рис. 3.29

Компонентные законы для резистивных элементов: $u_3 = R_1 i$; $u_2 = R_2 i$, откуда $u_B = u_1 - (R_1 + R_2)i$. Поскольку $i = 0$ при $u_1 < 0$, имеем:

$$u_B = \begin{cases} u_1 & \text{при } u_1 < 0; \\ 0 & \text{при } u_1 \geq 0 \end{cases}$$

(рис. 3.29, в).

3. Обратимся к схеме на рис. 3.27, в. Здесь $u_2 = u_B$ и, следовательно, u_2 не может быть положительным:

$$u_2 \leq 0$$

Иными словами (рис. 3.30),

$$u_2 = \begin{cases} \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1 & \text{при } u_1 < 0; \\ 0 & \text{при } u_1 \geq 0. \end{cases}$$

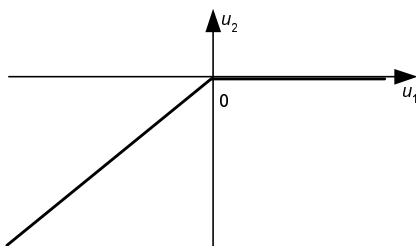


Рис. 3.30

Опять-таки мы видим, что ХПН схемы с вентилем можно рассматривать как откорректированную ХПН схемы без вентиля.

Обобщив результаты этих и других аналогичных задач, можно сформулировать правила анализа схем замещения, содержащих вентили:

1. Направления отсчета напряжения и токов вентилях выбираем так, как показано на рис. 3.26.
2. Удаляем вентили, т. е. вентили, включенные последовательно, заменяем закоротками, а включенные параллельно, — разрывами.
3. Решаем линейную задачу.
4. Находим связь искомых переменных с токами закороток и напряжениями разрывов.

5. Руководствуясь неравенствами (13.3), находим ограничения для искомым переменных.
6. В соответствии с п. 5 корректируем результаты, полученные при решении линейной задачи.

13.6. Получение ХПН аналитическим методом

Применим сформулированные правила к анализу схемы на рис. 3.25.

1. Удалим вентили (рис. 3.31).

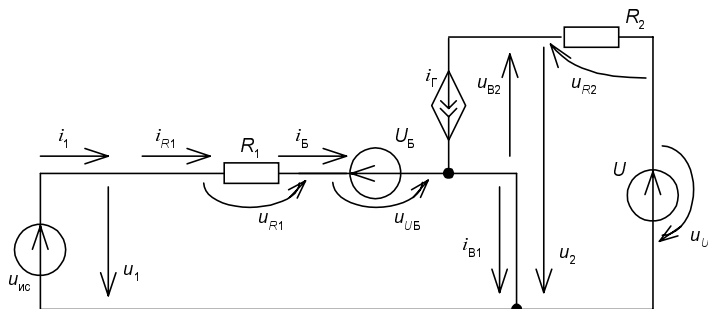


Рис. 3.31

2. Решим линейную задачу:

$$\begin{array}{lcl}
 u_2 = u_U - u_{R_2} & & \\
 \downarrow & u_{R_2} = R_2 i_\Gamma & \\
 u_U = U & i_\Gamma = B i_\text{Б} & \\
 & i_\text{Б} = u_{R_1} / R_1 & \\
 & u_{R_1} = u_1 - u_{U_\text{Б}} & \\
 & \downarrow & u_{U_\text{Б}} = U_\text{Б} \\
 & u_{R_1} = u_1 - U_\text{Б} & \\
 & \downarrow & \\
 & i_\text{Б} = (u_1 - U_\text{Б}) / R_1 & \\
 & i_\Gamma = B(u_1 - U_\text{Б}) / R_1 & \\
 & \downarrow & \\
 & u_{R_2} = B \frac{R_2}{R_1} (u_1 - U_\text{Б}) & \\
 \downarrow & & \\
 u_2 = U - B \frac{R_2}{R_1} (u_1 - U_\text{Б}). & &
 \end{array}$$

(13.4)

Найденная зависимость показана на рис. 3.32. Выражение для U_1 найдем, положив в (13.4) $u_2 = 0$:

$$0 = U - B \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_B);$$

$$U_1 = \frac{R_1}{BR_2} U + U_B.$$

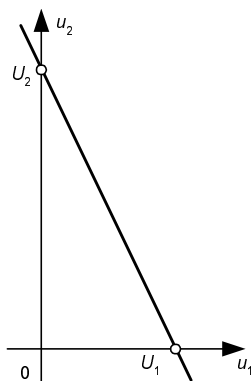


Рис. 3.32

Выражение для U_2 получим, положив в (13.4) $u_1 = 0$:

$$U_2 = U + B \frac{R_2}{R_1} U_B.$$

3. Найдем связь между u_2 и i_{B1} (см. рис. 3.31):

$$\begin{array}{lcl} u_2 = U - R_2 i_\Gamma & & \\ \downarrow & i_\Gamma = i_{B1} - i_B & \\ & \downarrow & i_B = i_\Gamma / B \\ & i_\Gamma = \frac{B}{B+1} i_{B1} & \\ \downarrow & & \\ u_2 = U - \frac{B}{B+1} R_2 i_{B1}. & & \end{array}$$

Поскольку $i_{B1} \geq 0$,

$$u_2 \leq U. \quad (13.5)$$

4. Найдем связь между u_2 , и u_{B2} . Поскольку $u_2 = -u_{B2}$ (см. рис. 3.31), а $u_{B2} \leq 0$, имеем

$$u_2 \geq 0. \quad (13.6)$$

Объединив неравенства (13.5) и (13.6): получим:

$$0 \leq u_2 \leq U.$$

В соответствии с последним неравенством уточним график функции $u_2 = u_2(u_1)$ (см. рис. 3.32). Представим ее в числах, приняв, согласно семейству выходных характеристик на рис. 3.10, α , $B = 70$ (рис. 3.33).

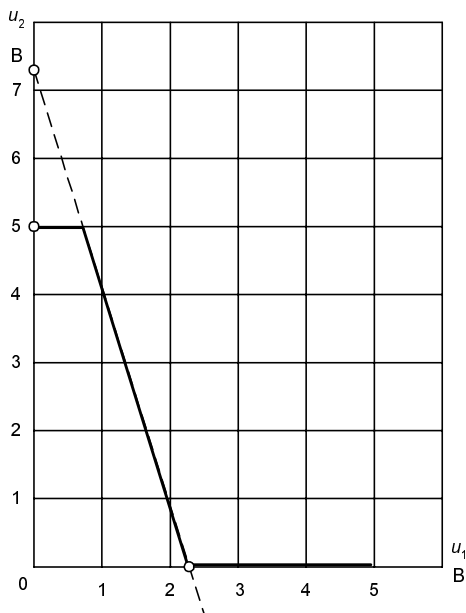


Рис. 3.33

Сравнив этот результат с результатом, найденным графически (см. рис. 3.17, *а*), видим, что разница очень невелика.

§ 14. Статический режим усилительных каскадов с ОБ и ОК

14.1. Построение ХПН УК с ОБ графическим методом

Познакомимся с усилительным каскадом параллельного типа, в котором транзистор включен с общей базой, найдя его ХПН. Его схема с абстрактными источником сигнала и нагрузкой показана на рис. 3.34.

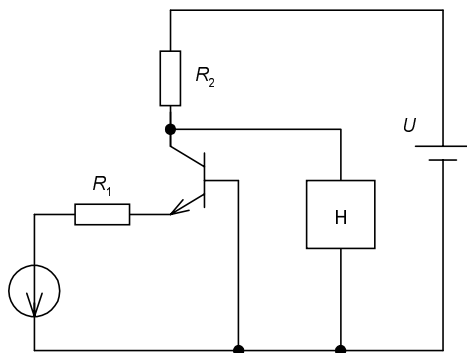


Рис. 3.34

Мы уже говорили, что в УК с ОБ, в отличие от УК с ОЭ, ток источника питания протекает через источник сигнала (рис. 3.35, а), то есть:

$$i_{\Theta} = i_{\text{Б}} + i_{\text{К}}.$$

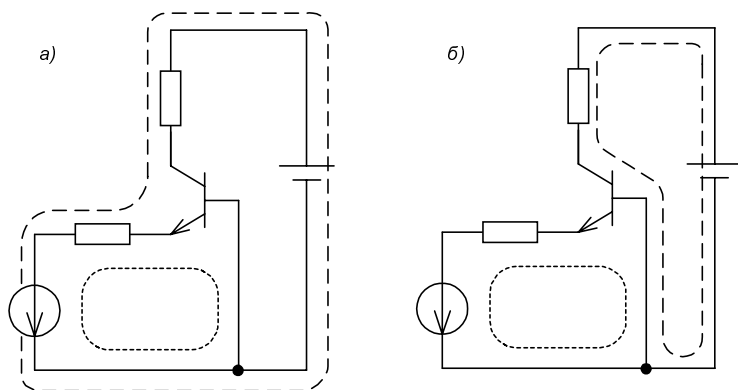


Рис. 3.35

С первого взгляда кажется, что по этой причине тот метод, которым мы воспользовались, строя ХПН УК с ОЭ, в данном случае неприменим. Однако ток базы можно представить как разность тока эмиттера и тока коллектора, замыкающихся каждый в своем контуре (рис. 3.35, б):

$$i_{\text{Б}} = i_{\text{Э}} - i_{\text{К}}.$$

Это допустимо, т. к. на том участке, где "текут" оба тока (между базой транзистора и общим проводом источников сигнала и питания) отсутствует элемент связи (влиянием сопротивления $r_{\text{Б}}$ (см. рис. 2.115) можно пренебречь).

Исследуя УК с ОБ, целесообразно использовать семейства характеристик транзистора, снятые при отсчете напряжений относительно базы (см. рис. 2.124). Положим $U = 5 \text{ В}$; $R_1 = 0,6 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,5 \text{ кОм}$.

Рассуждаем так же, как при построении ХПН УК с ОЭ.

1. Делим выходной контур на два двухполюсника по линии 2-2 (рис. 3.36).

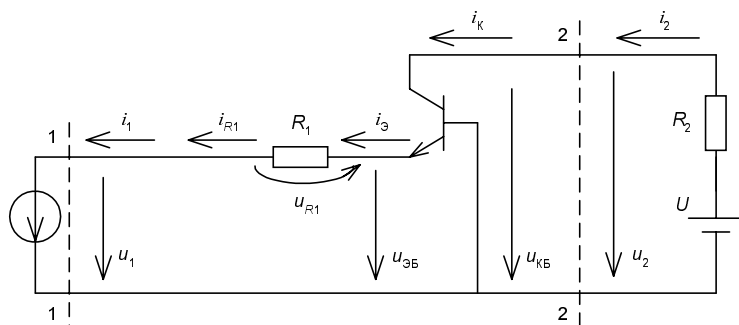


Рис. 3.36

На семейство выходных характеристик транзистора наносим прямую, служащую ВАХ правого двухполюсника (рис. 3.37) и отмечаем точки 1...6 пересечения характеристик.

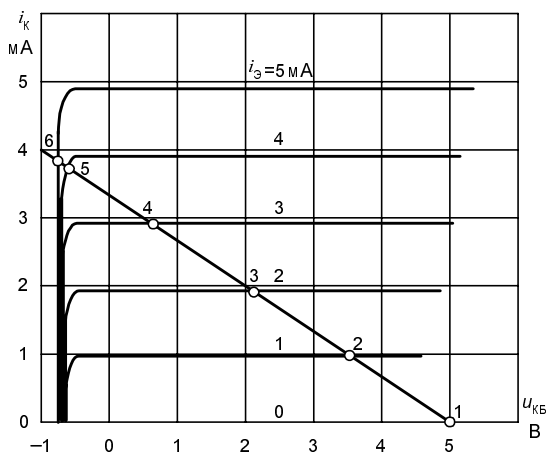


Рис. 3.37

2. Если это допустимо (см. рис. 3.14 и комментарий к нему), пренебрегаем зависимостью тока эмиттера от напряжения коллектор-база и выбираем "среднюю" входную характеристику.

3. Делим входной контур по линии 1-1 (см. рис. 3.36) и находим ВАХ двух-полюсника, состоящего из резистора R_1 и промежутка эмиттер-база транзистора, складывая значения напряжений u_{R_1} и $u_{ЭБ}$ при одинаковых значениях тока (рис. 3.38).

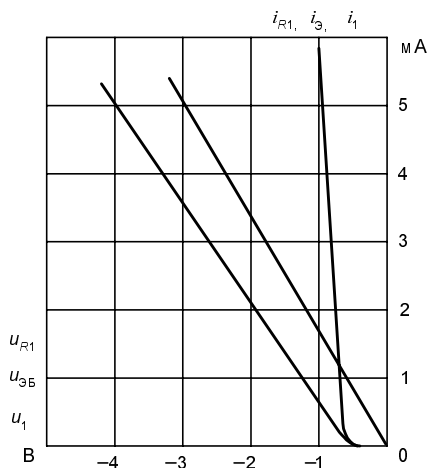


Рис. 3.38

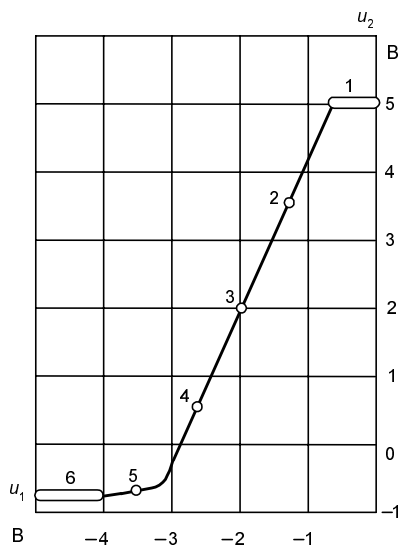


Рис. 3.39

4. На полученной зависимости отмечаем точки 1...6, соответствующие значениям тока эмиттера 0...5 мА и находим отвечающие им значения напряжения u_1 . На основании графиков рис. 3.37 и рис. 3.38 строим ХПН (рис. 3.39).

По аналогии с ХПН УК с ОЭ нетрудно догадаться, что верхний горизонтальный участок соответствует области отсечки, нижний — области насыщения, а наклонный — активной области работы транзистора.

14.2. Получение ХПН УК с ОБ аналитически

Построим ту же ХПН аналитически, используя простейшую полносигнальную схему замещения транзистора, полученную в результате кусочно-линейной аппроксимации его характеристик, снятых при включении транзистора по схеме с ОЭ (рис. 3.40, а).

Воспользуемся правилами, сформулированными в п. 13.5.

Удаляем вентили (рис. 3.40, б) и находим ХПН линейной схемы:

$$\begin{aligned}
 u_2 &= u_U - u_{R_2} \\
 u_{R_2} &= R_2 i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= B i_B \\
 \Downarrow \quad i_B &= i_{B1} - i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= B i_{B1} - B i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= \frac{B}{B+1} i_{B1} \\
 i_{B1} &= \frac{u_{R_1}}{R_1} \\
 u_{R_1} &= u_{ЭБ} - u_1 \\
 u_{ЭБ} &= -U_B \\
 i_{B1} &= -\frac{U_B + u_1}{R_1} \\
 i_\Gamma &= -\frac{B}{B+1} \cdot \frac{U_B + u_1}{R_1} \\
 u_{R_2} &= -\frac{B}{B+1} \cdot \frac{R_2}{R_1} (U_B + u_1) \\
 u_2 &= U + \frac{B}{B+1} \cdot \frac{R_2}{R_1} (U_B + u_1).
 \end{aligned} \tag{14.1}$$

$$u_2 = U + \frac{B}{B+1} \cdot \frac{R_2}{R_1} (U_B + u_1). \tag{14.2}$$

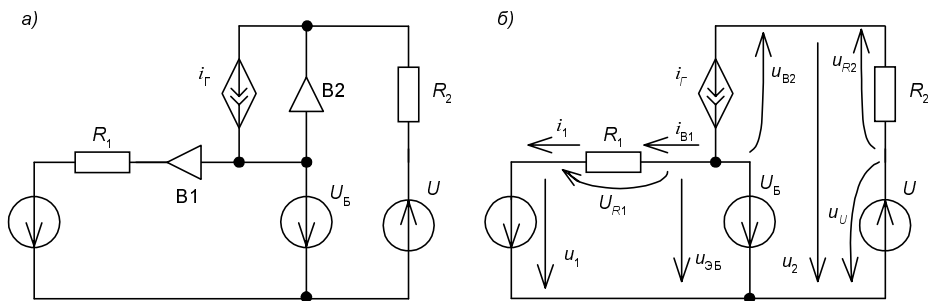


Рис. 3.40

Ищем две точки прямой $u_2 = u_2(u_1)$ на осях. Положив $u_2 = 0$ в формуле (14.2), получим

$$U_1 = -\left(\frac{B+1}{B} \cdot \frac{R_1}{R_2} U + U_B\right). \quad (14.3)$$

Аналогично, положив $u_1 = 0$, найдем

$$U_2 = U + \frac{B}{B+1} \cdot \frac{R_2}{R_1} U_B. \quad (14.4)$$

Найдем ограничения.

Воспользовавшись формулой (14.1), получим связь u_2 с i_{B1} :

$$u_2 = U - R_2 \frac{B}{B+1} i_{B2}.$$

Поскольку $i_{B2} \geq 0$, то

$$u_2 \leq U. \quad (14.5)$$

Связь u_2 с u_{B2} найдем по второму закону Кирхгофа:

$$u_2 = u_{эБ} - u_{B2};$$

$$u_{эБ} = -U_B;$$

$$u_2 = -U_B - u_{B2}.$$

Поскольку $u_{B2} \leq 0$, то

$$u_2 \geq -U_B. \quad (14.6)$$

Объединив неравенства (14.5) и (14.6), получим

$$-U_B \leq u_2 \leq U. \quad (14.7)$$

По формулам (14.3) и (14.4) вычислим: $U_1 = -2,67$ В; $U_2 = 6,72$ В и построим ХПН (рис. 3.41).

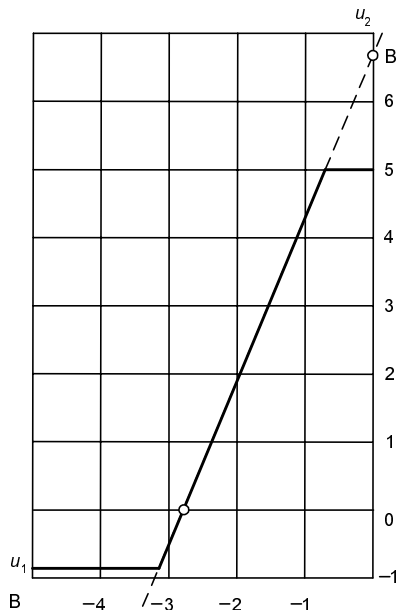


Рис. 3.41

14.3. Построение ХПН УК с ОК

В отличие от усилительных каскадов с ОЭ и ОБ, УК с ОК недоступен рассмотренному графическому методу исследования, т. к. входной и выходной контуры невозможно разделить: они связаны нагрузкой в последовательной схеме или токоограничивающим резистором — в параллельной схеме (см. рис. 1.24). Поэтому прибегнем к аналитическому методу, заменив транзистор четырехкомпонентной схемой замещения (рис. 3.42, а).

По сравнению с ранее рассмотренными схемами, в применении УК с ОК обычно имеются два отличия. Во-первых, на входе отсутствуют вспомогательные элементы, т. е. входной точкой переменного потенциала служит непосредственно база транзистора (точка a на рис. 3.42, а). Во-вторых, УК с ОК, как правило, используется в виде последовательной схемы, так что R_2 (рис. 3.42, а) — не токоограничивающий резистор, а нагрузка.

Хотя входом УК с ОК обычно бывает пара выводов $\{a, \vartheta\}$ (см. рис. 3.42, а), в качестве ХПН найдем зависимость $u_2(u_1)$, а не $u_2(u_B)$, чтобы учесть влияние сопротивления R_1 источника сигнала. Решаем задачу уже известным мето-

дом, начав с удаления вентиляй (рис. 3.42, б) и получения ХПН линейной схемы:

$$\begin{aligned}
 u_2 &= R_2 i_{B1} \\
 i_{B1} &= i_B + i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= B i_B \\
 i_{B1} &= (B+1) i_B \quad i_B = \frac{u_{R1}}{R_1} \\
 u_{R1} &= u_1 - U_B - u_2 \\
 i_B &= \frac{u_1 - U_B - u_2}{R_1} \\
 i_{B1} &= (B+1) \frac{u_1 - U_B - u_2}{R_1} \\
 u_2 &= \frac{(B+1)R_2}{R_1 + (B+1)R_2} (u_1 - U_B). \tag{14.8}
 \end{aligned}$$

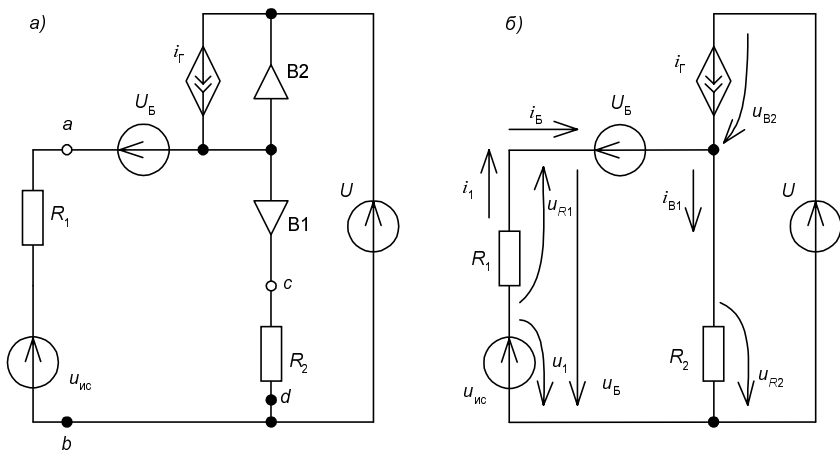


Рис. 3.42

Строим график найденной зависимости (рис. 3.43, где штриховой линией показана биссектриса: $u_2 = u_1$).

Находим связь u_2 с i_{B1} . Сразу видно, что $u_2 = R_2 i_{B1}$. Так как $i_{B1} \geq 0$, имеем

$$u_{B2} \geq 0. \tag{14.9}$$

Связь u_2 с u_{B2} столь же проста: $u_2 = U + u_{B2}$. Поскольку $u_{B2} \leq 0$,

$$u_2 \leq U. \tag{14.10}$$

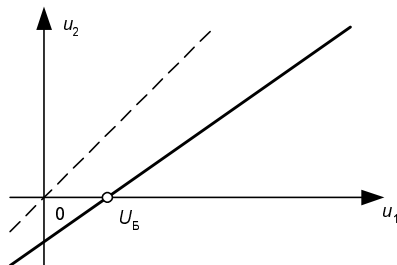


Рис. 3.43

Объединив неравенства (14.9) и (14.10), получим

$$0 \leq u_2 \leq U. \quad (14.11)$$

Откорректируем зависимость, показанную на рис. 3.43 (рис. 3.44). Выражение для U_1 найдем, положив $u_2 = U$ в формуле (14.8):

$$U_1 = \frac{R_1 + (B+1)R_2}{(B+1)R_2} U + U_{\text{Б}}. \quad (14.12)$$

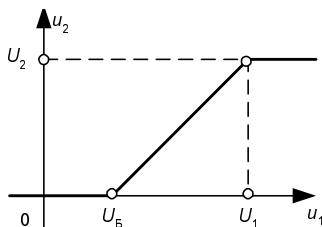


Рис. 3.44

14.4. Схема замещения УК с ОК

Присмотримся к формуле (14.8). Она соответствует делителю напряжения, показанному на рис. 3.45, где

$$R_{2\text{экв}} = (B+1)R_2. \quad (14.13)$$

Двухполюсник $\{U_{\text{Б}}, R_{2\text{экв}}\}$, расположенный справа от точек a и b , не что иное, как конкретизация ДВ1 на рис. 3.5 применительно к УК с ОК.

Формулу (14.8) можно интерпретировать и иначе. Поделим числитель и знаменатель на $B+1$:

$$u_2 = \frac{R_2}{\frac{R_1}{B+1} + R_2} (u_1 - U_{\text{Б}}).$$

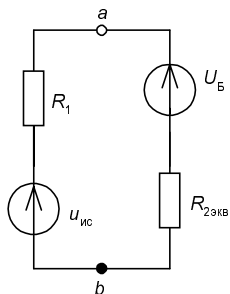


Рис. 3.45

Эта формула соответствует делителю напряжения, показанному на рис. 3.46, где

$$R_{1ЭКВ} = \frac{R_1}{B + 1}. \quad (14.14)$$

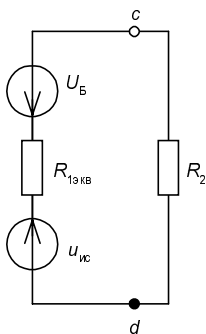


Рис. 3.46

Двухполюсник $\{u_{ИС}, R_{1ЭКВ}, U_B\}$, расположенный левее точек c и d , соответствует ДВ2 на рис. 3.6.

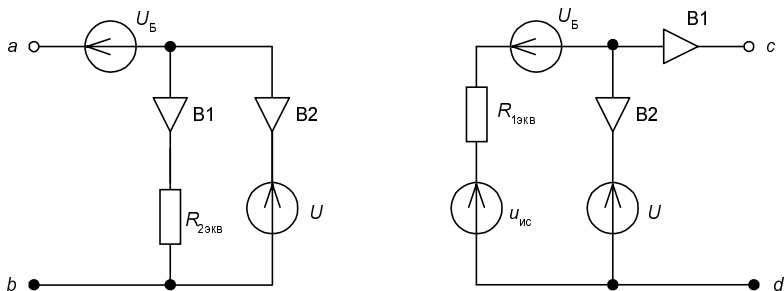


Рис. 3.47

Дополнив схемы на рис. 3.45 и рис. 3.46 вентилями, получим удобную для расчетов схему замещения УК с ОК, состоящую из двухполюсников ДВ1 и ДВ2 (рис. 3.47).

14.5. Эмиттерный повторитель

УК с ОК часто именуют эмиттерным повторителем (это — модификация термина *катодный повторитель*, введенного в "ламповую эпоху"). Название обусловлено следующим обстоятельством. Если выразить Δu_2 через Δu_B (см. рис. 3.42, б), то мы получим

$$\Delta u_2 = \Delta u_B,$$

т. е. изменение выходного напряжения (напряжения эмиттера) "повторяет" изменение входного напряжения.

Такой результат получился благодаря применению прямоугольной аппроксимации входной характеристики транзистора. Если учесть ее наклон, т. е. ввести в схему замещения транзистора резистивный элемент, r_B (см. рис. 2.115), то

$$\Delta u_2 = \frac{R_2}{\frac{r_B}{B+1} + R_2} \Delta u_B. \quad (14.15)$$

Обычно $r_B/(B+1) \ll R_2$, ввиду чего $\Delta u_2 \approx \Delta u_B$.

В связи с этим возникает вопрос: если коэффициент передачи напряжения

$$K_U = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_3} \quad (14.16)$$

примерно равен единице, для чего нужен эмиттерный повторитель? Почему не подключить нагрузку непосредственно к выходу источника сигнала (рис. 3.48)?

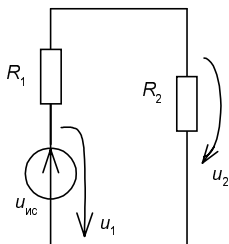


Рис. 3.48

Дело в том, что формулу (14.16) нельзя считать определяющей коэффициент передачи напряжения. В действительности коэффициентом передачи напряжения называют отношение Δu_2 к Δu_1 (см. рис. 3.42, б). Поэтому на его значение сильно влияет сопротивление R_1 . Сравним коэффициенты передачи напряжения для схемы с УК с ОК (см. рис. 3.42, б) и без него (рис. 3.48). Первый получим, воспользовавшись формулой (14.8)

$$K_U = \frac{R_2}{\frac{R_1}{B+1} + R_2}.$$

Второй — применив формулу для делителя напряжения:

$$\frac{\Delta u_2}{\Delta u_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Рассмотрим пример: $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $B = 100$.

$$K_U = 0,9;$$

$$\frac{\Delta u_2}{\Delta u_1} = 0,09.$$

Как видим, влияние УК с ОК весьма ощутимо.

Замечание

Усилительный каскад с ОК называют "эмиттерным повторителем", т. к. его выходное напряжение "повторяет" входное напряжение. По аналогии усилительный каскад с ОБ можно назвать "коллекторным повторителем", т. к. его выходной ток "повторяет" входной ток: $\Delta i_k \approx \Delta i_{\text{э}}$. При этом выходное дифференциальное сопротивление "повторителя тока" оказывается очень высоким — равным $h_{22\text{Б}}$.

14.6. Идентификация состояния и области работы транзистора

В предыдущих пунктах мы рассмотрели работу усилительных каскадов в полном диапазоне изменения переменных и ввели понятия об областях работы транзистора. Для УК с ОЭ они воспроизведены на рис. 3.49.

Часто, однако, возникает необходимость установить состояние и область работы транзистора в определенной ситуации. Для этого целесообразно структурировать схему, содержащую источник сигнала, усилительный каскад и нагрузку так, чтобы в центре композиции оказался транзистор, а

слева и справа от него — входной (ВД) и выходной (ВыхД) двухполюсники (рис. 3.50).

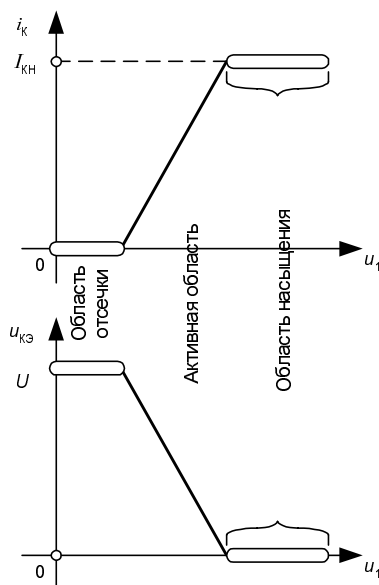


Рис. 3.49

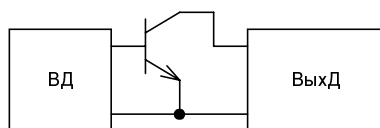


Рис. 3.50

Тогда область работы транзистора легко найти, соотнеся характеристики транзистора с характеристиками ВД и ВыхД. Порядок работы состоит в следующем.

1. Чертим схему, как показано на рис. 3.50.
2. Аналитически, руководствуясь теоремой Тевенина—Нортонa (см. п. 9.8) или графически (построив ВАХ) находим значение напряжения холостого хода U_{xx1} входного двухполюсника.

Если оказывается, что $U_{xx1} < 0,5$ В, то $u_{БЭ} = U_{xx1}$ и, следовательно, транзистор заперт, т. е. налицо область отсечки.

В противном случае транзистор открыт, но неясно, какова его рабочая область — активная или насыщения.

3. Чтобы ответить на этот вопрос, находим конкретное значение i_B^* тока базы (см. рис. 3.14 и комментарий к нему в п. 13.2).
4. Строим в одной координатной плоскости ВАХ выходного двухполюсника и выходную характеристику транзистора, соответствующую значению тока базы i_B^* (см. п. 11.7).

Если ток короткого замыкания выходного двухполюсника $I_{кз2} = I'_{кз2}$ больше, чем $i_{Г}^*$, его ВАХ пересечет характеристику транзистора на пологом участке (точка 1 на рис. 3.51), т. е. налицо активная область. Если же $I_{кз2} = I''_{кз2} < i_{Г}^*$, точка пересечения окажется на крутом участке (точка 2 на рис. 3.51). Это — область насыщения.

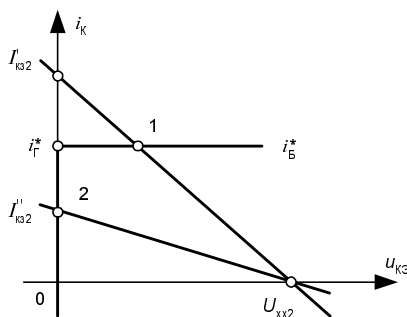


Рис. 3.51

Сказанное сведено в табл. 3.1 и табл. 3.2.

Таблица 3.1

U_{xx1} , В	Состояние транзистора
$< 0,5$	Заперт
$> 0,5$	Открыт

Таблица 3.2

$I_{кз2}$	Рабочая область
$> i_{Г}^*$	Активная
$< i_{Г}^*$	Насыщенная

§ 15. Коэффициенты передачи тока, напряжения и мощности

15.1. Определения

Важнейшими параметрами усилительных каскадов, введенными для количественного оценивания эффективности их работы в пределах активной области, являются коэффициенты передачи тока, напряжения и мощности.

Коэффициент передачи тока K_I есть безразмерная физическая величина, равная модулю отношения мгновенного значения $\tilde{i}_2$ выходного тока усилительного каскада, равного току нагрузки, к мгновенному значению $\tilde{i}_1$ входного тока, равного току источника сигнала:

$$K_I = \left| \frac{\tilde{i}_2}{\tilde{i}_1} \right|.$$

Коэффициент передачи напряжения K_U — безразмерная величина, равная модулю отношения мгновенного значения $\tilde{u}_2$ выходного напряжения к мгновенному значению $\tilde{u}_1$ входного напряжения:

$$K_U = \left| \frac{\tilde{u}_2}{\tilde{u}_1} \right|.$$

Коэффициент передачи мощности K_P есть безразмерная величина, равная модулю отношения мгновенного значения P_2 мощности выходного сигнала к мгновенному значению мощности входного сигнала P_1 :

$$K_P = \left| \frac{P_2}{P_1} \right|.$$

Поскольку мгновенная мощность равна произведению мгновенных значений тока и напряжения ($P = \tilde{i} \cdot \tilde{u}$),

$$K_P = K_I K_U.$$

По определению усилительным каскадом называют только такое устройство, коэффициент передачи мощности которого больше единицы. Однако один из коэффициентов передачи — K_I или K_U — может быть меньше единицы. Видимо в связи с этим существует группа неправильно ориентирующих терминов *усилитель напряжения*, *усилитель тока* и *усилитель мощности*, позволяющая подумать, будто каждый из них усиливает только что-то одно.

Каждый коэффициент передачи многокаскадного усилителя равен произведению соответствующих коэффициентов передачи входящих в него усилительных каскадов.

15.2. Коэффициенты передачи УК с ОЭ

Найдем коэффициенты передачи для параллельной схемы, показанной на рис. 3.9. Поскольку понятия коэффициентов передачи имеют смысл только для активной области, воспользуемся малосигнальной схемой замещения транзистора (см. рис. 2.123), содержащей два компонента — r_b и i_r . Нагрузку заменим резистивным элементом r_H (рис. 3.52). Для упрощения записи опустим волнистую черточку под обозначениями переменных составляющих токов и напряжений.

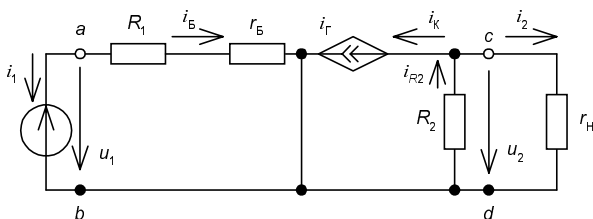


Рис. 3.52

1. Коэффициент передачи тока.

$$\begin{aligned}
 i_2 &= \frac{u_2}{R_H} \\
 u_2 &= -R_2 i_{R_2} \\
 i_{R_2} &= i_K + i_2 \\
 i_K &= i_\Gamma = B i_B \\
 i_B &= i_1 \\
 i_K &= B i_1 \\
 i_{R_2} &= B i_1 + i_2 \\
 u_2 &= -R_2 B i_1 - R_2 i_2 \\
 i_2 &= -\frac{B R_2}{r_H} i_1 - \frac{R_2}{r_H} i_2 \\
 (R_2 + r_H) i_2 &= -B R_2 i_1 \\
 K_I^{ОЭ} &= \left| \frac{i_2}{i_1} \right| = \frac{B \cdot R_2}{R_2 + r_H}.
 \end{aligned}$$

Легко увидеть, каково теоретически предельное (практически недостижимое) значение коэффициента передачи тока. Поделив числитель и знаменатель на R_2 и положив $R_2 \rightarrow \infty$ (что соответствовало бы использованию источника тока в качестве источника питания), получим

$$K_{I \text{ пред}}^{\text{ОЭ}} = B.$$

2. Коэффициент передачи напряжения

$$\begin{aligned}
 u_2 &= r_H i_2 \\
 i_2 &= i_{R_2} - i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= B i_1 \\
 i_1 &= \frac{u_1}{R_1 + r_B} \\
 i_\Gamma &= \frac{B u_1}{R_1 + r_B} \\
 i_{R_2} &= -\frac{u_2}{R_2} \\
 i_2 &= -\frac{u_2}{R_2} - \frac{B u_1}{R_1 + r_B} \\
 u_2 &= -\frac{r_H}{R_2} u_2 - \frac{B r_H}{R_1 + r_B} u_1 \\
 (R_2 + r_H) u_2 &= -\frac{B R_2 r_H}{R_1 + r_B} u_1
 \end{aligned}$$

$$K_U^{\text{ОЭ}} = \left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \frac{B R_2 r_H}{(R_1 + r_B)(R_2 + r_H)}.$$

Предельное значение коэффициента передачи напряжения имеем также при $R_2 \rightarrow \infty$:

$$K_{U \text{ пред}}^{\text{ОЭ}} = \frac{B r_H}{R_1 + r_B}.$$

3. Коэффициент передачи мощности

$$K_P^{\text{ОЭ}} = K_I K_U = \frac{B^2 R_2^2 r_H}{(R_1 + r_B)(R_2 + r_H)}.$$

15.3. Коэффициенты передачи УК с ОБ

От схемы на рис. 3.34 перейдем к малосигнальной схеме замещения (рис. 3.53).

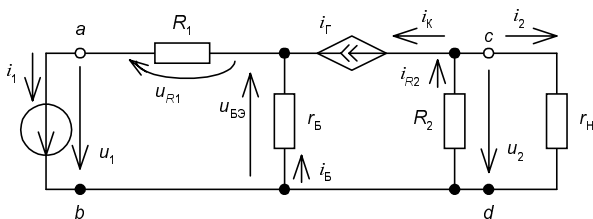


Рис. 3.53

$$\begin{aligned}
 i_2 &= \frac{u_2}{r_H} \\
 u_2 &= -R_2 i_{R_2} \\
 i_{R_2} &= i_{\Gamma} + i_2 \\
 i_{\Gamma} &= B i_{\text{Б}} \\
 \downarrow i_{\text{Б}} &= i_1 - i_{\Gamma} \\
 i_{\Gamma} &= B i_1 - B i_{\Gamma} \\
 i_{\Gamma} &= \frac{B}{B+1} i_1 = \alpha i_1 \\
 i_{R_2} &= \alpha i_1 + i_2 \\
 u_2 &= -\alpha R_2 i_1 - R_2 i_2 \\
 \downarrow \\
 i_2 &= -\alpha \frac{R_2}{r_H} i_1 - \frac{R_2}{r_H} i_2 \\
 (R_2 + r_H) i_2 &= -\alpha R_2 i_1
 \end{aligned}$$

$$K_I^{\text{ОБ}} = \left| \frac{i_2}{i_1} \right| = \frac{R_2 \alpha}{R_2 + r_H}.$$

1. Предельный коэффициент передачи тока, соответствующий $R_2 \rightarrow \infty$

$$K_{I\text{пред}}^{\text{ОБ}} = \alpha < 1.$$

2. Коэффициент передачи напряжения

$$\begin{aligned}
 u_2 &= r_H i_2 \\
 i_2 &= i_{R_2} - i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= \alpha i_\Sigma = \alpha i_1 \\
 i_1 &= \frac{u_{R_1}}{R_1} \\
 u_{R_1} &= -u_1 - u_{БЭ} \\
 u_{БЭ} &= r_B i_B \\
 i_B &= i_1 - i_\Gamma \\
 i_\Gamma &= B i_B \\
 i_B &= \frac{i_1}{B+1} \\
 u_{БЭ} &= \frac{r_B}{B+1} i_1 \\
 u_{R_1} &= -u_1 - \frac{r_B}{B+1} i_1 \\
 i_1 &= -\frac{u_1}{R_1} - \frac{1}{B+1} \cdot \frac{r_B}{R_1} i_1 \\
 ((B+1)R_1 + r_B)i_1 &= -(B+1)u_1 \\
 i_1 &= -\frac{B+1}{(B+1)R_1 + r_B} u_1 \\
 i_\Gamma &= -\frac{B}{B+1} \cdot \frac{B+1}{(B+1)R_1 + r_B} u_1 = -\frac{B}{(B+1)R_1 + r_B} u_1 \\
 i_{R_2} &= -\frac{u_2}{R_2} \\
 i_2 &= -\frac{u_2}{R_2} + \frac{B}{(B+1)R_1 + r_B} u_1 \\
 u_2 &= -\frac{r_H}{R_2} u_2 + \frac{B r_H}{(B+1)R_1 + r_B} u_1 \\
 (R_2 + r_H)u_2 &= \frac{B R_2 r_H}{(B+1)R_1 + r_B} u_1 \\
 K_U^{ОБ} &= \left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \frac{R_2 r_H \alpha}{(R_1 + r_B)(B+1)(R_2 + r_H)}.
 \end{aligned}$$

Как правило, $r_B/(B+1) \ll R_1$. Поэтому для $R_2 \rightarrow \infty$ и $\alpha \approx 1$.

$$K_{U \text{ пред}}^{ОБ} = \frac{r_H}{R_1}.$$

Отметим, что при надлежащем выборе параметров ($r_H > R_1$) $K_U^{OB} > 1$.

3. Предельный коэффициент передачи мощности

$$K_{P_{\text{пред}}}^{OB} = \frac{r_H}{R_1}.$$

15.4. Коэффициенты передачи УК с ОК

Рассмотрим коэффициенты передачи последовательной схемы УК с ОК, дополнив схему на рис. 3.42, б элементом r_B и удалив из нее источники постоянного напряжения (рис. 3.54).

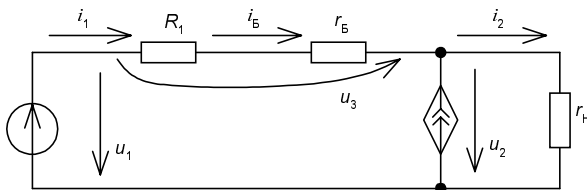


Рис. 3.54

1. Коэффициент передачи тока

$$i_2 = i_T + i_B = (B + 1)i_B = (B + 1)i_1;$$

$$K_I^{OK} = \left| \frac{i_2}{i_1} \right| = B + 1.$$

2. Коэффициент передачи напряжения

$$\begin{aligned} u_2 &= r_H i_2 \\ i_2 &= i_T + i_1 \\ i_1 &= \frac{u_3}{R_1 + r_B} \\ u_3 &= u_1 - u_2 \\ i_1 &= \frac{u_1}{R_1 + r_B} - \frac{u_2}{R_1 + r_B} \\ i_T &= B i_1 \\ i_2 &= (B + 1) \left(\frac{u_1}{R_1 + r_B} - \frac{u_2}{R_1 + r_B} \right) \\ \left(1 + \frac{(B + 1)r_H}{R_1 + r_B} \right) u_2 &= \frac{(B + 1)r_H}{R_1 + r_B} u_1. \end{aligned}$$

$$K_U^{OK} = \frac{r_H}{(R_1 + r_B)/(B+1) + r_H}.$$

Как видим, K_U^{OK} при любых условиях меньше единицы, но близок к ней.

3. Коэффициент передачи мощности

$$K_P^{OK} = \frac{(B+1)r_H}{(R_1 + r_B)/(B+1) + r_H}.$$

15.5. Обратная связь в усилителе

Вспомним определяющее свойство усилителя: мощность $P_2 = P_H$ выходного сигнала больше мощности $P_1 = P_{ис}$ входного сигнала (рис. 3.55).

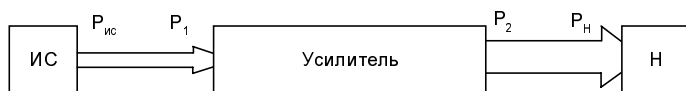


Рис. 3.55

Выходным сигналом можно воздействовать не только на нагрузку, но и на вход самого усилителя (рис. 3.56). Передачу сигнала с выхода усилителя на его вход называют **обратной связью**. В этом случае $P_H = P_2 - P_{ос}$, а $P_1 = P_{ис} \pm P_{ос}$. Возможны два вида обратной связи — **положительная** и **отрицательная**. В первом случае $P_1 > P_{ис}$, во втором $P_1 < P_{ис}$ (на рис. 3.56 и в последней формуле этот факт представлен знаками "±").

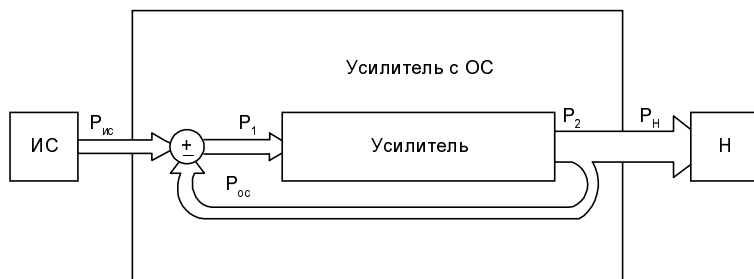


Рис. 3.56

Для оценивания глубины обратной связи вводят величину β , называемую **коэффициентом обратной связи**:

$$\beta = \frac{P_{ос}}{P_2}.$$

Выразим коэффициент K_P^{oc} передачи мощности усилителя с обратной связью через $K_P = P_2/P_1$ и β .

$$K_P^{\text{oc}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{ис}}}.$$

$$P_{\text{н}} = P_2 - P_{\text{oc}} = P_2 - \beta P_2 = (1 - \beta)P_2$$

$$\begin{aligned} & \begin{array}{l} P_2 = K_P P_1 \\ \downarrow \\ P_1 = P_{\text{ис}} \pm P_{\text{oc}} \\ P_2 = K_P (P_{\text{ис}} \pm P_{\text{oc}}) = K_P P_{\text{ис}} \pm K_P \beta P_2 \\ (1 \mp \beta K_P) P_2 = K_P P_{\text{ис}} \\ P_2 = \frac{K_P P_{\text{ис}}}{1 \mp \beta K_P} \\ \downarrow \\ P_{\text{н}} = \frac{K_P (1 - \beta) P_{\text{ис}}}{1 \mp \beta K_P} \\ K_P^{\text{oc}} = \frac{(1 - \beta) K_P}{1 \mp \beta K_P}. \end{array} \end{aligned} \quad (15.1)$$

Проследив вывод, отметим, что в знаменателе знак минус соответствует положительной обратной связи, а плюс — отрицательной.

Положительная обратная связь

Исходим из того, что, как правило, $K_P \gg 1$, а $\beta \ll 1$. Допустим, β постепенно увеличивается, начиная от 0. Тогда произведение βK_P в знаменателе приближается к единице, т. е. знаменатель уменьшается и K_P^{oc} растет. Наконец, при $\beta K_P = 1$ знаменатель обращается в ноль, а $K_P^{\text{oc}} \rightarrow \infty$. Каков же физический смысл этого математического вывода?

Вспомним два факта: 1) вид характеристики передачи напряжения известных нам усилительных каскадов и 2) утверждение, что понятия коэффициентов передачи относятся к активной области работы транзистора. Из них следует, что с ростом K_P^{oc} увеличивается крутизна активной области ХПН, а при $K_P^{\text{oc}} \rightarrow \infty$ этот участок становится вертикальным (рис. 3.57, а).

При дальнейшем увеличении βK_P , казалось бы, активный участок ХПН должен продолжать поворачиваться против часовой стрелки (прерывистая линия на рис. 3.57, а). В действительности же при $1 - \beta K_P < 0$ характеристика передачи напряжения становится гистерезисной (рис. 3.57, б).

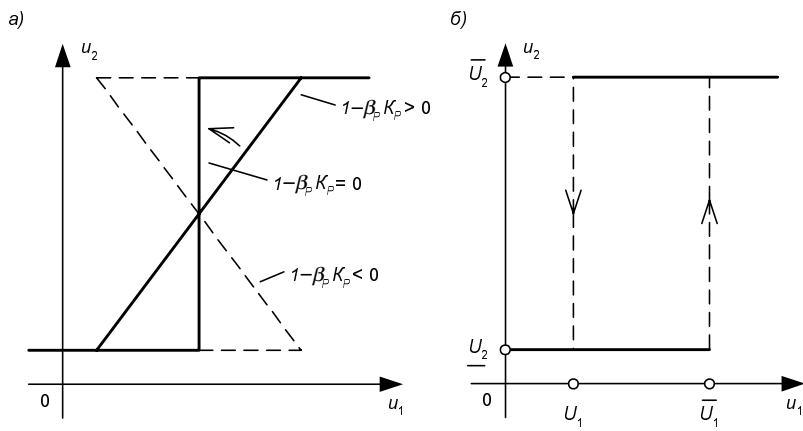


Рис. 3.57

Замечание

Усилитель с такой ХПН именуют триггером Шмитта.

В диапазоне $\underline{U}_1 < u_1 < \bar{U}_1$ выходное напряжение может равняться как $\underline{U}_2$, так и $\bar{U}_2$. Это обстоятельство позволяет осуществлять устройства двух видов — **запоминающие элементы** и **автогенераторы**. Запоминающий элемент способен произвольно долго находиться в одном из двух состояний ($u_2 = \underline{U}_2$ или $u_2 = \bar{U}_2$) и под действием внешних сигналов переходить из одного состояния в другое. Автогенератор (генератор) преобразует постоянное электрическое поле источника питания в переменное.

Рассмотрим возможный принцип действия автогенератора. Кроме формы, показанной на рис. 3.57, б, гистерезисная характеристика может иметь иной вид (рис. 3.58).

Допустим, к элементу с такой характеристикой подключен RC-трехполюсник (рис. 3.59).

В соответствии с ХПН (см. рис. 3.58) выходное напряжение может принимать одно из двух значений: либо $\underline{U}_2$, либо $\bar{U}_2$. Предположим, в момент времени, который мы обозначим как $t = 0$, $u_1 = U_{10} > \bar{U}_1$. Ему соответствует $u_2 = \underline{U}_2$. Поскольку $u_C = u_1 > u_2$, конденсатор C разряжается и напряжение u_1 стремится к уровню $\underline{U}_1$ (см. § 10). Начертим соответствующую экспоненту (рис. 3.60, а). Понижению u_1 соответствует движение изображающей точки влево по нижнему горизонтальному участку гистерезисной петли (см. рис. 3.58). В момент $t = t_1$ она достигнет точки $(\underline{U}_1; \underline{U}_2)$. Нижний горизон-

тальный участок заканчивается, и изображающая точка "вынуждена скакнуть вверх", т. е. при $t = t_1 + 0$ напряжение u_2 станет равным $\bar{U}_2$. Но $\bar{U}_2 > \underline{U}_1$. Поэтому конденсатор начинает заряжаться, а его напряжение — стремится к уровню $\bar{U}_2$ (см. рис. 3.60). Это соответствует движению изображающей точки вправо по верхнему горизонтальному участку (см. рис. 3.58). В момент $t = t_2$ ее абсцисса достигнет значения $\bar{U}_1$. "Скакнув вниз", точка вновь начнет двигаться влево и т. д. Временная диаграмма напряжения u_2 показана на рис. 3.60, б.

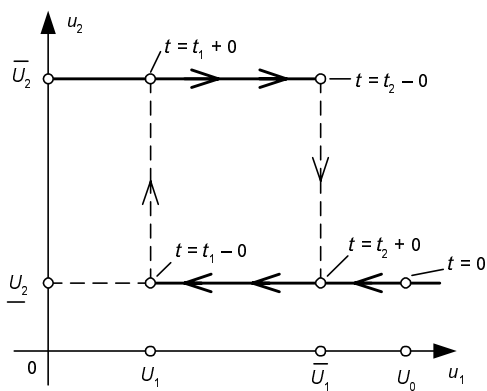


Рис. 3.58

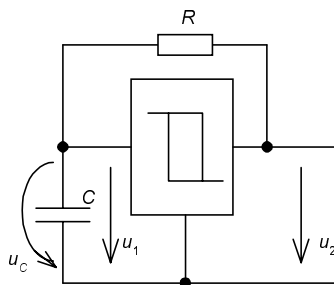


Рис. 3.59

Обязательным элементом автогенератора является времязадающий (хронизирующий) элемент. В рассмотренном варианте генератора эту роль выполняет RC-трехполюсник. Генераторы, вырабатывающие колебания, по форме далекие от гармонических (как в рассмотренном случае), называются **релаксационными**. В генераторах, порождающих колебания, по форме близкие к гармоническим, хронизирующими элементами служат резонаторы, например LC-контур.

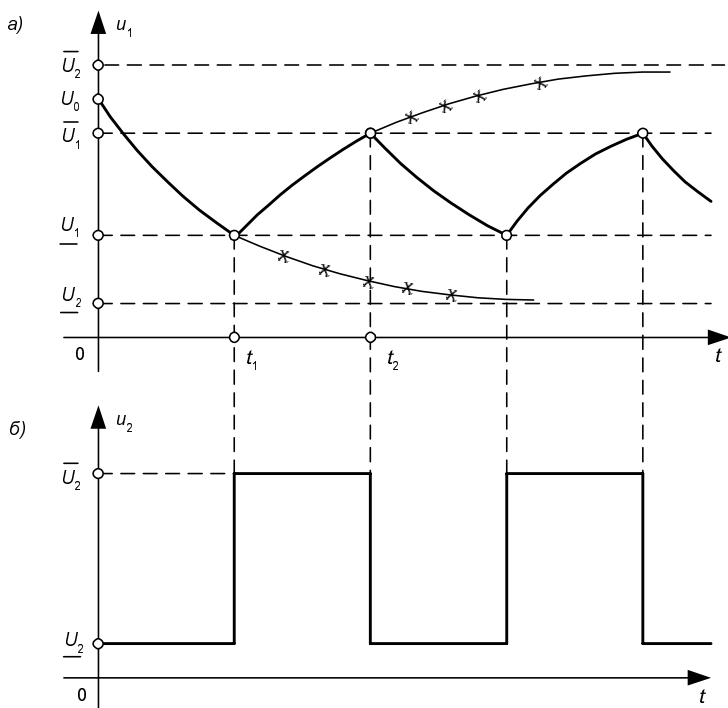


Рис. 3.60

Отрицательная обратная связь

При увеличении глубины отрицательной обратной связи (ООС) знаменатель в формуле (15.1) растет. Это приводит к уменьшению коэффициента передачи мощности, но имеет настолько важные положительные последствия, что такую цену охотно платят.

Коэффициент передачи B тока базы транзистора нестабилен. В рабочем диапазоне температур он изменяется примерно в 2 раза. Значит, коэффициент передачи напряжения трехкаскадного усилителя с ОЭ может изменяться примерно в 8 раз. Обычно это недопустимо. На конкретном примере посмотрим, как влияет введение отрицательной обратной связи. Пусть $K_P = 10^4 \dots 10^5$; $\beta = 10^{-2}$. Подставив эти значения в формулу (15.1), получим результаты, показанные в табл. 3.3. Обратим внимание:

$$K_P^{\text{oc}} \approx \frac{1}{\beta}.$$

Таблица 3.3

K_p	K_p^{oc}
10^4	98
10^5	99

Эта формула легко получается из (15.1), т. к. $K_p \gg 1 \gg \beta$.

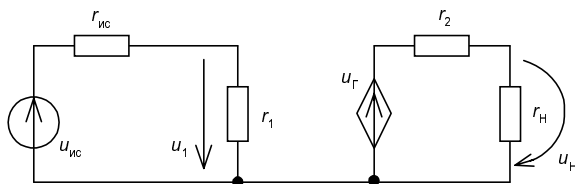
Более того, в результате стабилизации коэффициента передачи в такой же мере улучшается линейность характеристик передачи напряжения и тока усилителя. Дело в том, что активная область ХПН — отнюдь не прямая. Поэтому от точки к точке дифференциальный коэффициент передачи напряжения изменяется, что недопустимо в измерительной аппаратуре. Отрицательная обратная связь и здесь приводит к желаемому результату.

Далее. Уменьшение коэффициентов передачи частично компенсируется тем, что входное сопротивление усилителя с ООС больше, чем входное сопротивление простого усилителя, а выходное — меньше (это можно показать). Посмотрим, как они влияют на коэффициент передачи напряжения K_U . Воспользуемся малосигнальной схемой замещения усилителя, показанной на рис. 3.4, удалив из нее, что обычно оправдано, зависимый источник μi_2 (рис. 3.61). Здесь r_1 — входное сопротивление усилителя, r_2 — его выходное сопротивление.

$$K_U = \frac{u_H}{u_{\text{ис}}}.$$

И на входе, и на выходе имеются делители напряжения. Вспомним формулу, полученную ранее (см. теорему 7 в п. 9.8).

$$\begin{array}{lcl}
 u_H = \frac{r_H}{r_2 + r_H} u_\Gamma & & \\
 \downarrow & u_\Gamma = K u_1 & \\
 & \downarrow & u_1 = \frac{r_1}{r_{\text{ис}} + r_1} u_{\text{ис}} \\
 & & \downarrow \\
 & & u_\Gamma = \frac{r_1}{r_{\text{ис}} + r_1} K u_{\text{ис}} \\
 \downarrow & & \\
 u_H = \frac{r_1}{r_{\text{ис}} + r_1} \cdot \frac{r_H}{r_2 + r_H} K u_{\text{ис}}.
 \end{array}$$

**Рис. 3.61**

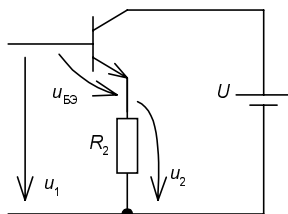
Преобразуем формулу так, чтобы влияние сопротивлений r_1 и r_2 было отчетливо видно:

$$K_U = \frac{K}{\left(\frac{r_{ис}}{r_1} + 1\right) \left(\frac{r_2}{r_н + 1}\right)}.$$

Как видим, K_U тем больше, чем больше r_1 и чем меньше r_2 .

Наконец, усилитель с ООС имеет еще одно важное преимущество. Коэффициенты передачи напряжения, тока и мощности зависят от частоты усиленного сигнала, а именно, понижаются с ее ростом. Диапазон частот, в пределах которого они изменяются в допустимых пределах, называют полосой пропускания усилителя. Верхняя (по частоте) граница полосы пропускания усилителя с ООС значительно выше верхней границы полосы пропускания простого усилителя.

Простейшим представителем усилителей с ООС является усилительный каскад с ОК (рис. 3.62).

**Рис. 3.62**

Вспомним: входом транзистора служит промежуток Б—Э. Его напряжение, $u_{БЭ}$, очевидно равно

$$u_{БЭ} = u_1 - u_2,$$

где u_1 — напряжение сигнала, поступающего от источника сигнала, а u_2 — выходное напряжение. Такую обратную связь называют стопроцентной (коэффициент обратной связи равен единице).

Замечание

В литературе можно встретить неточные формулировки, например: "Введение отрицательной обратной связи уменьшает коэффициент передачи напряжения усилителя". Все параметры простого усилителя, в том числе, его коэффициент передачи напряжения, не зависят от наличия или отсутствия обратной связи. Меньшим оказывается коэффициент передачи **другого объекта** — усилителя с ООС (см. рис. 3.56), т. е. **системы**, состоящей из простого усилителя и устройства, обеспечивающего ООС.

§ 16. Мультивибратор

В заключение убедимся, что изложенный выше материал позволяет исследовать несложные схемы. В качестве примера выберем мультивибратор — электронное устройство, относящееся к классу релаксационных генераторов (рис. 3.63). Он привлекателен двумя обстоятельствами. Во-первых, обзиримостью — состоит из двух одинаковых каскадов с ОЭ, каждый из которых содержит транзистор и два резистора. Во-вторых, это — автогенератор — система, самостоятельно, без внешнего источника сигнала генерирующая колебания, в результате чего нет необходимости вводить какие-либо дополнительные предположения. Источник питания у обоих усилительных каскадов — общий. Выход каждого из них соединен со входом другого конденсатором, т. е. имеется петля связей (поскольку схема симметрична, выделить "прямую" и "обратную" связь невозможно).

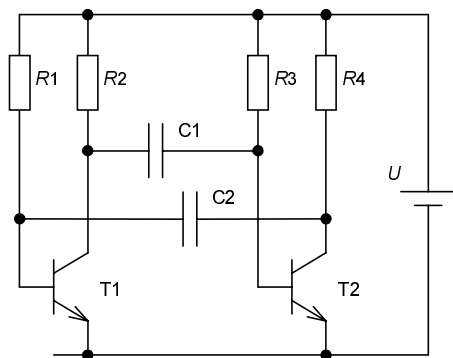


Рис. 3.63

Возьмем типичные значения параметров: $B_1 = B_2 = 50$; $R_1 = R_3 = 20$ кОм; $R_2 = R_4 = 1$ кОм; $C_1 = C_2 = 10$ нФ; $U = 5$ В.

Смонтировав мультивибратор и подключив осциллограф к одному из его выходов, мы увидим колебания (рис. 3.64). Отпаяв один из конденсаторов, мы разорвем петлю связей, в результате чего колебания прекратятся. Оба транзистора окажутся насыщенными. Ввести мультивибратор в такое состояние можно, не разрывая петли связей. Для этого необходимо и достаточно кратковременно зашунтировать закороткой промежуток коллектор-эмиттер одного из транзисторов.

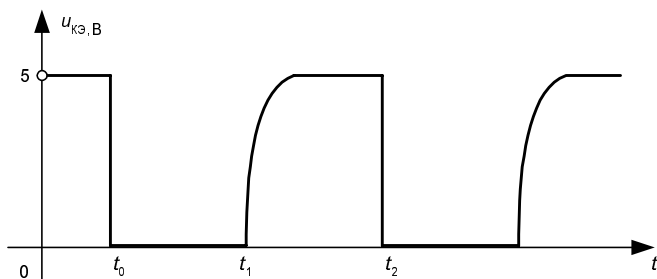


Рис. 3.64

Чтобы проанализировать процессы в мультивибраторе, необходимо составить его схему замещения, для чего требуется выбрать мысленные модели всех элементов. Как указывалось, начнем с простейших моделей, а именно, источник питания заменим источником напряжения, резисторы — резистивными элементами, конденсаторы — емкостными элементами. Сложнее выбрать модель транзистора. Присмотримся к временной диаграмме на рис. 3.64. В интервале времени $(t_0; t_1)$ $u_{кэ} \approx 0$, откуда следует, что транзистор насыщен. Значительную часть интервала $(t_1; t_2)$ $u_{кэ} \approx 5$ В — в это время транзистор заперт (убедитесь в этом сами, рассмотрев контур: положительный полюс источника питания — коллекторный резистор — промежуток К–Э транзистора — отрицательный полюс источника питания). Переходы от запертого состояния к насыщенному (моменты времени t_0 ; t_2 на рис. 3.64) происходят очень быстро. Этот факт может быть отображен замыканием идеального ключа. На том отрезке времени, когда напряжение $u_{кэ}$ растет медленно, вообще говоря, может происходить одно из двух: либо транзистор запирается медленно, либо он запирается быстро, но постепенное нарастание обусловлено зарядкой конденсатора. Второй вариант для анализа проще — быстро запирающийся транзистор можно заменить размыкающимся ключом. Руководствуясь правилом выбора простейшей модели, остановимся на этом варианте — заменим промежуток К–Э транзистора идеальным ключом.

Для промежутка Б–Э применим прямоугольную аппроксимацию характеристики (см. рис. 2.116, а), полагая $U_B = 0,7$ В.

Вначале рассмотрим состояния усилительных каскадов, когда колебания не происходят. Так как схема симметрична, они одинаковы, т. е. достаточно рассмотреть один каскад (рис. 3.65, а). "Размножим" источник напряжения (рис. 3.65, б). Очевидно, что ток базы протекает и, следовательно, $u_{БЭ} = U_B$; $i_B = i_{R_1} = (U - U_B)/R_1 = 4,3/20 = 0,2$ мА. Обратимся к выходному контуру (см. п. 14.6). Ток $i_T = \beta i_B = 50 \cdot 0,2 = 10$ мА; $I_{KH} \approx I_{K3} = U/R_2 = 5$ мА. Отсюда следует, что транзистор насыщен, т. е. ключ, замещающий промежуток К–Э замкнут; $u_{КЭ} = 0$.

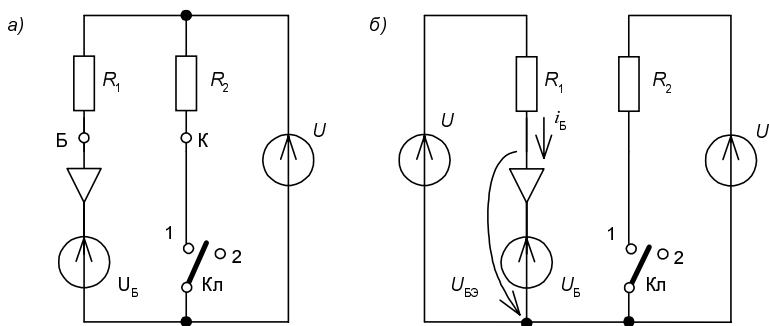


Рис. 3.65

В таком состоянии, даже если петля связи не разомкнута, цепь может находиться сколь угодно долго: коэффициенты передачи напряжения и тока при насыщенных транзисторах пренебрежимо малы, и флуктуации не могут привести к срабатыванию петли связей.

Чтобы вывести цепь из состояния покоя, необходимо и достаточно кратковременно шунтировать закороткой промежуток Б–Э одного из транзисторов, например, Т1. Рассмотрим, что за этим последует (см. рис. 3.65, б и рис. 3.66). В момент шунтирования ток i_{B1} станет равным нулю. Следовательно, КЛ1 разомкнется. Напряжение $U_{КЭ1}$ постепенно (должен зарядиться емкостный элемент C_1) повысится до 5 В. Напряжение u_{C2} станет равным нулю ($u_{C2} = u_{КЭ2} - u_{БЭ1}$), а напряжение вырастет до значения 4,3 В ($u_{C1} = u_{КЭ1} - u_{БЭ2}$).

После удаления закоротки емкостный элемент C_2 начнет заряжаться с постоянной времени равной произведению $R_1 C_2$ током i_{R_1} , текущем в контуре: положительный полюс источника питания — резистивный элемент R_1 — C_2 — ключ КЛ2 — отрицательный полюс источника питания. В результате этого напряжение $u_{БЭ1}$ растет, стремясь к значению 5 В (рис. 3.67, а, где за $t = 0$ принят момент отключения закоротки).

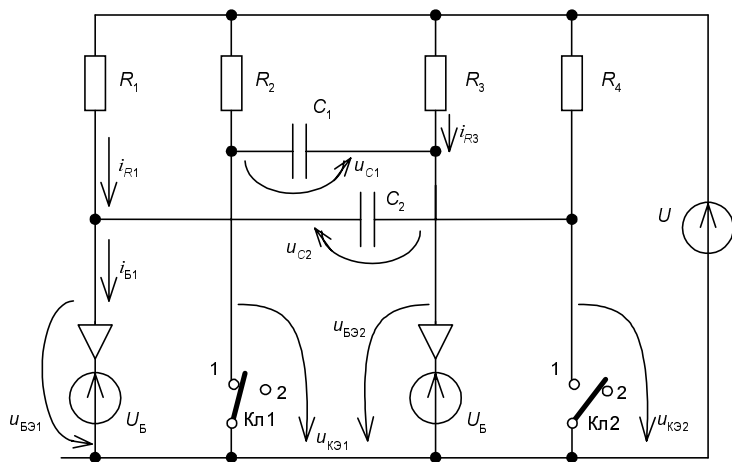


Рис. 3.66

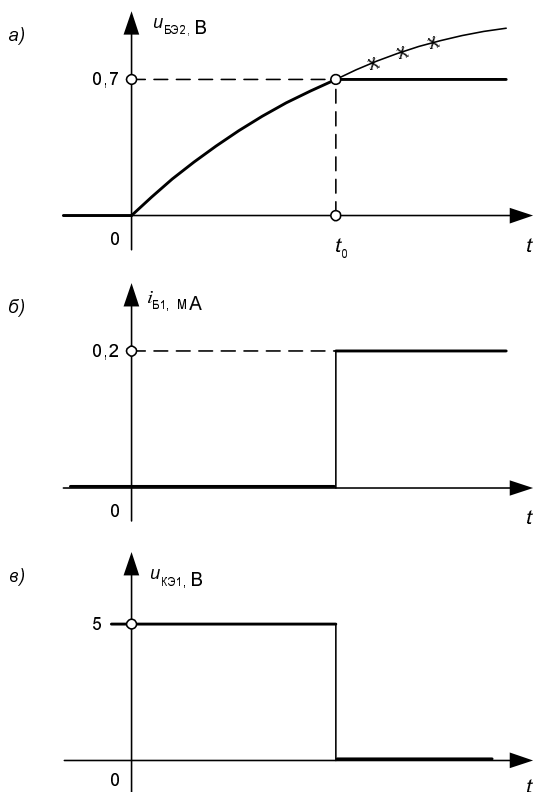


Рис. 3.67

Однако, когда $u_{БЭ1}$, достигнет значения $0,7$ В (момент t_0 на рис. 3.67, а), его рост прекратится, т. к. ток потечет через промежуток Б–Э транзистора Т1 (рис. 3.67, б). Этот факт вызовет мгновенный переход ключа Кл1 из состояния 2 в состояние 1 и, соответственно, скачкообразное уменьшение напряжения $u_{КЭ1}$ (рис. 3.67, в).

Перейдем к процессам в транзисторе Т2. До момента t_0 Кл1 был разомкнут. Напряжение $u_{КЭ1}$ равнялось 5 В, а напряжение $u_{БЭ2} = 0,7$ В. Поэтому напряжение $u_{C1} = 4,3$ В ($u_{C1} = u_{КЭ1} - u_{БЭ2}$). В момент замыкания Кл1 напряжение $u_{КЭ1}$ становится равным нулю, а напряжение емкостного элемента мгновенно измениться не может. Поэтому вместе с $u_{КЭ1}$ скачком до уровня минус $4,3$ В упадет напряжение $u_{БЭ2}$ (рис. 3.68 и рис. 3.69), благодаря чему ключ Кл2 разомкнется.

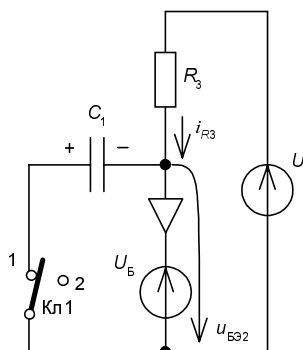


Рис. 3.68

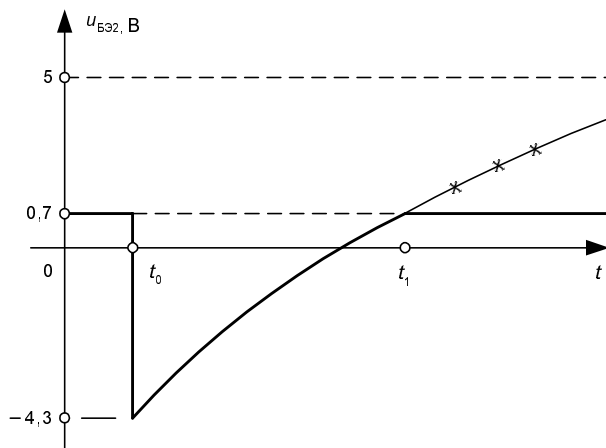


Рис. 3.69

Начиная с этого момента времени емкостный элемент C_2 начнет перезаряжаться с постоянной времени, равной произведению $R_4 C_2$, током, текущем в контуре: положительный полюс источника питания — резистивный элемент R_4 — C_2 — промежуток Б—Э транзистора Т1 — отрицательный полюс источника питания. Именно поэтому напряжение $u_{КЭ2} = u_{C_2} + u_{БЭ1}$ (рис. 3.70) нарастает не скачком, а постепенно.

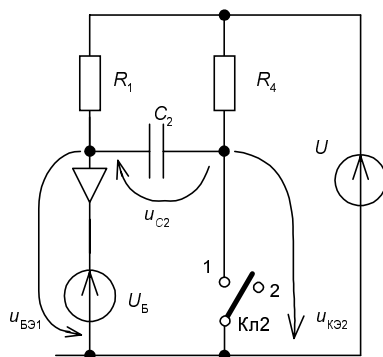


Рис. 3.70

Одновременно (см. рис. 3.68) перезаряжается емкостный элемент C_1 с постоянной времени, равной произведению $R_3 C_1$, током i_{R_3} , текущим в контуре: положительный полюс источника питания — резистивный элемент R_3 — C_1 — отрицательный полюс источника питания. В результате этого $u_{БЭ2}$ растет, стремясь к уровню +5 В. В момент t_1 (см. рис. 3.69) оно достигнет значения 0,7 В, и ток i_{R_3} переключится в базу транзистора Т2. Ключ КЛ2 замкнется. Иными словами, с транзистором Т2 происходит то же самое, что произошло в момент t_0 с транзистором Т1. В результате Т1 запретится и дальнейший ход событий будет определяться процессом перезарядки емкостного элемента C_2 .

Таким образом, временные диаграммы всех переменных напряжений имеют вид, показанный на рис. 3.71.

Длительность полупериода колебаний $T/2 = t_1 - t_0$ (см. рис. 3.69) легко найти следующим образом. Руководствуясь соображениями, изложенными в п. 10.3, напишем выражение для экспоненты $u_{БЭ2}$, начиная с момента времени t_0 (см. рис. 3.69):

$$u_{БЭ2} = -4,3 + 9,3 (1 - e^{-(t-t_0)/R_3 C_1}).$$

Момент t_1 найдем, решив трансцендентное уравнение

$$0,7 = -4,3 + 9,3 (1 - e^{-(t_1-t_0)/R_3 C_1}).$$

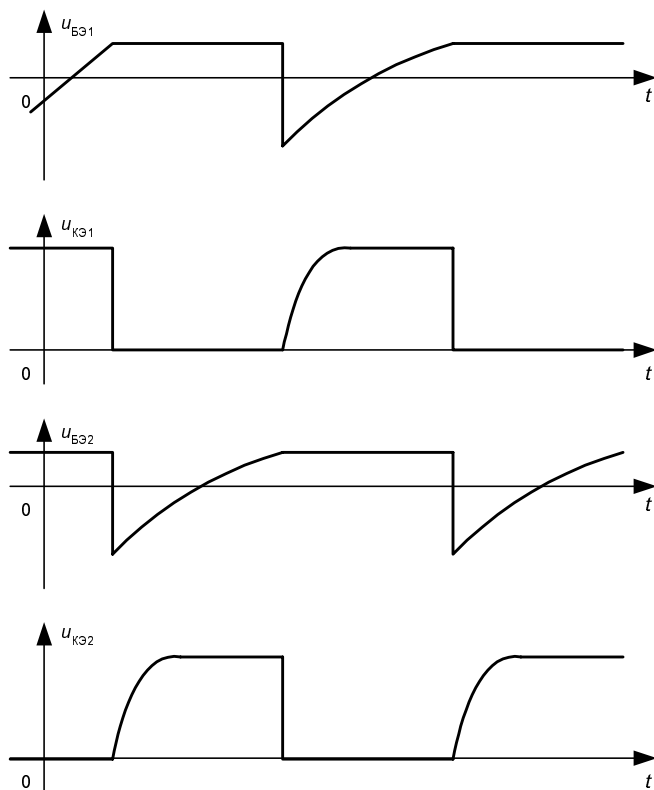


Рис. 3.71

Разумеется, транзисторы переключаются не мгновенно. Но по сравнению с другими постоянными времени в рассматриваемой цепи временем их переключения можно пренебречь.

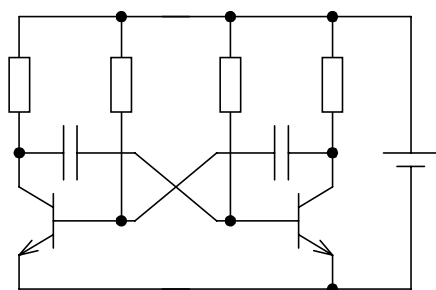


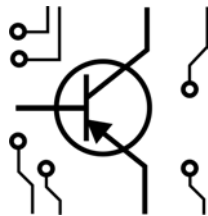
Рис. 3.72

Смонтировав мультивибратор и наблюдая осциллограммы напряжений, мы убедимся, что временные диаграммы, полученные теоретически, отличаются от них незначительно. Этот факт служит свидетельством правильности выполненного анализа.

Замечание

Обычно схему мультивибратора чертят более симметрично, чем на рис. 3.63 (рис. 3.72).

Послесловие



Метод восхождения от абстрактного к конкретному

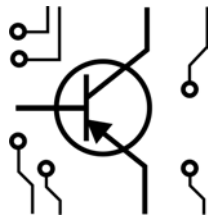
Вдумайтесь в идею построения рассказа о транзисторных цепях. После методологического вступления, опираясь на чувственные представления о реальной вещи — проигрывателе грампластинок, т. е. на **чувственно конкретное** мы ввели **предельную абстракцию** — "энергетический портрет" усилительного каскада. Предельной абстракцией он является по двум причинам: во-первых, чтобы не утратилось качество (усиление), из него нельзя удалить ни одного элемента; во-вторых, он годится для объяснения принципа действия усилительных каскадов любой физической природы — электронных, пневматических, гидравлических и др.

Дальнейшее изложение состояло в **конкретизации**, т. е. наполнении предельной абстракции деталями. Особенность этого процесса заключалась в том, что каждый раз мы исходили из реальных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и т. д.), но "строительство" было не практическим — мы не спаивали между собой элементы, образуя электрическую цепь, — а теоретическим, на бумаге. Следовательно, мы строили **мысленную модель** электрической цепи из абстракций — мысленных моделей ее элементов. Они были представлены в виде условных графических обозначений и характеристик элементов (связывающих физические величины), заданных либо графически (ВАХ, ХПН, временные диаграммы), либо в виде формул. В результате от предельной абстракции мы пришли к **мысленно конкретному** — теоретическим представлениям о реальных усилительных каскадах, межкаскадных связях, их свойствах и т. п.

Такой путь является основным диалектическим методом теоретического познания в любой области. Его называют **методом восхождения от абстрактного к конкретному**. К сожалению, в этом названии отражен только второй этап — движение мысли от предельной абстракции (которую К. Маркс называл "кле-

точной") к мысленно конкретному. Однако надо понимать, что он невозможен без первого этапа — этапа формирования предельной абстракции на основании анализа чувственно конкретного. В учебной литературе первый этап, как правило, занимает мало места. Однако в реальном познании он часто бывает очень продолжительным и иногда остается не до конца осмысленным. Например, авторы некоторых учебников в энергетический портрет усилительного каскада не включают источник питания. Очень часто пишут, что транзистор (или электронная лампа) "усиливает" сигнал. В действительности ни транзистор, ни лампа сами по себе усилителями не являются. Они — управляющие элементы. Без источника питания усилить сигнал, т. е. получить на выходе сигнал большей мощности, чем на входе, невозможно.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Динамические системы

Важную роль в развитии мышления человека, т. е. способности сознательно воспринимать и применять имеющиеся знания, а также производить новые знания, играют междисциплинарные (трансдисциплинарные) связи. Замечены они были давно. Еще в 1908 г. В. И. Ленин, излагая взгляды Больцмана, писал: "Единство природы обнаруживается в «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям знания" (Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. — М., 1986, с. 310). Динамические аналогии служат основой применения аналоговых вычислительных машин. В современной "большой науке" имеются впечатляющие примеры использования междисциплинарного подхода.

Так, выдающийся математик академик Л. С. Понтрягин рассказывает, что в 1950—51 годы руководство Стекловского института рекомендовало ему заняться прикладными задачами — теорией колебаний и теорией регулирования. Он организовал семинар, участники которого вначале просто изучали монографию Андронова, Витта и Хайкина "Теория колебаний", в частности, понятия и законы теории электрических цепей — уравнения Кирхгофа, математические модели резистора, конденсатора, катушки и т. п. Любой доклад должен был начинаться с конкретного описания действительности и лишь после этого переходить к математической модели и ее исследованию. К работе семинара в качестве докладчиков привлекали инженеров, рассказывавших о своих реальных задачах. Эта работа привела к важному научному достижению — математической теории оптимального управления, центральным результатом которой стал принцип максимума Понтрягина (Понтрягин Л. С. Жизнеописание Л. С. Понтрягина, математика, составленное им самим. — М., 1998, с. 118).

О втором факте рассказывает академик Н. Н. Моисеев. В конце 60-х годов П. О. Сухой обратился в вычислительный центр АН СССР с предложением совместно создать систему многовариантного проектирования самолетов. "Деятельность разработчиков оказалась чрезвычайно плодотворной благодаря тому, что математики вникали в содержание инженерных задач и стиль мышления инженеров, а инженеры не боялись переступить порог математической неграмотности и учились у математиков" (Моисеев Н. Н.

С мыслями о будущем России. — М., 1997, с. 18). Результат такого симбиоза хорошо известен — многие из самолетов "СУ" оказываются лучшими в мире.

В "точных" науках трансдисциплинарные связи это, прежде всего, связи между ними и математикой. К сожалению, математику давно уже преподают в отрыве от предметных дисциплин, в силу чего учащимся приходится "выучивать" ее, а не осмысливать, и применять не сознательно, а "по образцу". В частности, остаются нераскрытыми многие отношения между понятиями теории обыкновенных дифференциальных уравнений, с одной стороны, и понятиями механики и теории электрических цепей, с другой. Более того, оказываются не полностью выявленными связи даже между двумя последними дисциплинами, хотя они были ясны уже по меньшей мере 70 лет назад (см. Харкевич А. А. Электромеханические аналогии // Журнал технической физики, 1931, т. 1, вып. 2—3, с. 136-158).

Исходя из вышеизложенного, я решил познакомить вас с этим направлением мысли.

Попробуйте ответить на следующие вопросы.

1. В одних случаях для анализа процессов в системе мы пользуемся алгебраическими уравнениями, в других — дифференциальными. Какими особенностями материальных систем это определяется?
2. В механике используют термин *обобщенные координаты*, в теории электрических цепей — термин *переменные состояния*. В каком отношении друг к другу они находятся?
3. Зависит ли как-то выбор обобщенных координат и переменных состояния от особенностей изучаемой системы или он произволен (подобно простановке размеров на машиностроительном чертеже)?
4. Детерминируется ли какими-нибудь особенностями изучаемой системы число обобщенных координат и переменных состояния?
5. Что имеют в виду, используя термин *состояние системы*?
6. Что означает выражение "Энергия — функция состояния"?
7. Каков физический смысл начальных условий? Чем определяется их количество?
8. Какими особенностями материальной системы определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего ее движение?
9. Чем физически обусловлено различие однородного и неоднородного дифференциальных уравнений?

На все эти вопросы можно ответить, поняв, что представляют собой объекты, называемые динамическими системами.

Состав динамических систем

Казалось бы, что может быть общего между движением механического устройства (токарного станка, автомобиля, подводной лодки, самолета) и процессами в транзисторных цепях ЭВМ? Тем не менее, существует и очень плодотворен общий взгляд на эти столь различные явления. Его возможность обусловлена тем, что более века назад люди придумали физическую величину, именуемую **энергией**, пригодную для количественного оценивания интенсивности всех видов движения, взаимодействия и преобразования материи. В последнем предложении слово *движение* использовано в широком смысле — не как синоним механического перемещения тел относительно друг друга, а как всякое изменение, причем покой принято считать частным случаем движения.

Во многих **системах** (см. п. 3.1) при изучении их с энергетических позиций выявляются общие черты. Прежде всего, обнаруживается, что можно рассматривать только четыре типа элементов — **источник** (движения), **диссипатор**, **динамический накопитель** и **статический накопитель**.

В источнике движение элементов среды какой-либо формы преобразуется в движение элементов системы, форма которого свойственна именно этой системе. Например, в механической системе источниками служат разные двигатели — электрический, внутреннего сгорания, пневматический и др. В электрической цепи источниками большей частью являются электромашинные генераторы или электрохимические элементы (в обыденной речи называемые "батареиками").

В диссипаторе происходит обратное преобразование: движение, форма которого свойственна изучаемой системе, преобразуется в движение другой формы, т. е. удаляется из системы в среду. В механических системах к числу диссипаторов принадлежат: электромашинные генераторы (в них механическое движение преобразуется в электромагнитное), металлорежущие станки, различные элементы трения и т. п.

Динамическими накопителями в механических системах являются поступательно движущиеся тела и маховики. Энергию их движения принято называть кинетической. В электрических цепях динамические накопители — индуктивные катушки.

Статическими накопителями в механических системах служат пружины (их энергию называют потенциальной). В электрических цепях статические накопители — конденсаторы.

Фактически каждое движущееся твердое тело (в том числе маховик) поддается упругому деформированию (то есть он "чуть-чуть пружина"). Однако его потенциальная энергия, обусловленная упругостью, обычно пренебрежимо мала по сравнению с кинетической энергией. Это позволяет для вы-

полнения теоретического исследования ввести мысленную модель твердого тела — **инерционный элемент**, приписав ему единственное свойство — инертность (вам этот элемент давно известен под нелепым названием "материальная точка").

Аналогично каждой пружине свойственна инертность, т. е. наряду с потенциальной энергией ее состояние оценивают и кинетической энергией. Но второй часто можно пренебречь. На этом основании вводят другую мысленную модель тела — **упругий элемент**, приписав ему единственное свойство — упругость. Он ничуть не хуже инерционного элемента (инерционный элемент служит простейшей мысленной моделью динамического накопителя, а упругий — статического). Однако в курсе физики "упругий аналог" материальной точки почему-то отсутствует. Результат этого подчас предельно абсурден. Так, в некоторых учебниках физики, рассматривая колебания пружинного маятника, не указывают, что это — система, состоящая из двух равноправных компонентов — инертного тела и пружины, а пишут "колебания тела, закрепленного на пружине". Затем "объясняют", что $mv^2/2$ — кинетическая энергия тела, а $kx^2/2$ — потенциальная энергия того же тела (а не пружины!).

Подобным же образом при теоретическом исследовании вводят мысленные модели источников и диссипаторов.

Системы, содержащие элементы названных четырех типов (число их экземпляров может быть разным), называют **динамическими**. "Энергетический портрет" динамической системы показан на рис. П1.1. Широкими стрелками изображены все возможные "потoki энергии".

Замечание

Словосочетание "потoki энергии" взято в кавычки потому, что это — иносказательное выражение. Энергию повсеместно определяют как физическую величину, т. е. предмет из мира идей. В природе нет вещи, именуемой энергией. Следовательно, ее "потoki" — тоже предмет из мира идей.

Динамическая система находится в движении, если на нее через источник воздействует среда или движение аккумулировано одним (или обоими) накопителями. Это утверждение легко понять, вспомнив, как устроены и работают самодвижущиеся игрушки. Причиной движения в них служит либо батарейка с электродвигателем (соответствующим источнику на рис. П1.1), либо маховик (динамический накопитель), либо пружина (статический накопитель).

Замечание

Хотя территориально батарейка расположена внутри игрушки, но функционально (согласно схеме на рис. П1.1) она — элемент среды, т. к. ей свойственно не механическое, а химическое движение.

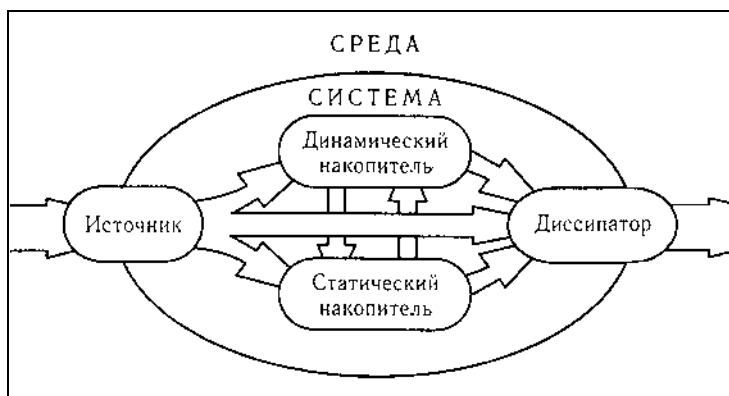


Рис. П1.1

Важное место в теории динамических систем занимает понятие **состояния системы**. Слово *состояние* используют тогда, когда хотят сказать о способности системы к предстоящим взаимодействиям. Внешнее воздействие на систему (через источник) определяется состоянием среды, а не системы (например, в самодвижущейся игрушке — степенью разряженности батарейки). Отсюда следует, что состояние системы необходимо оценивать энергией ее накопителей.

Межэлементные аналогии

Математическое описание процессов в динамической системе ведут на языке теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Поэтому важно установить связи между математическими понятиями и понятиями, относящимися к самим динамическим системам. Займемся этим.

При анализе движения динамических систем в качестве переменных используют **не энергию, а другие величины, однозначно с ней связанные**. Их называют **переменными состояния** или **обобщенными координатами** (первый термин применять предпочтительнее, т. к. он является правильно ориентирующим). Число переменных состояния равно количеству независимых накопителей. Независимыми называют накопители, мысленные модели которых в расчетной (теоретической) схеме невозможно объединить методами формальных преобразований.

Сопоставление описания поступательного движения в механических системах и процессов в электрических цепях позволяет сформулировать общие

свойства переменных состояния и элементов динамических систем. Начнем с электрических накопителей.

Энергия W_C конденсатора определяется формулами:

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{q_C^2}{2C} = \frac{q_C u_C}{2}, \quad (\text{П1.1})$$

где C — емкость конденсатора; q_C — заряд конденсатора; u_C — напряжение между выводами конденсатора.

Следовательно, в качестве переменной состояния можно использовать напряжение конденсатора или его заряд (обычно используют напряжение).

Энергия W_L индуктивной катушки определяется формулами

$$W_L = \frac{Li_L^2}{2} = \frac{\sigma_L^2}{2L} = \frac{\sigma_L i_L}{2}, \quad (\text{П1.2})$$

где L — индуктивность катушки; σ_L — вольтсекундная площадь катушки; i_L — сила тока в выводах катушки.

Значит, в качестве переменных состояния можно использовать силу тока катушки или ее вольтсекундную площадь (обычно используют силу тока).

Поведение конденсатора приближенно описывают формулами

$$q_C = Cu_C, \quad (\text{П1.3a})$$

или

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}. \quad (\text{П1.3б})$$

Поведение индуктивной катушки приближенно описывают формулами

$$\sigma_L = Li_L, \quad (\text{П1.4a})$$

или

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}. \quad (\text{П1.4б})$$

Обратим внимание на своеобразную аналогию (ее называют **дуальностью**) формул (П1.3) и (П1.4). Например, формулы (П1.3б) и (П1.4б) переходят друг в друга, если слева от знака равенства поменять местами ток и напряжение, справа — скорости их изменения, а параметр C заменить параметром L . Дуальность обусловлена тем, что и конденсатор, и индуктивная катушка — **накопители**, т. е. (в этом отношении) — равноправные элементы.

Вспомним также, что произведение $u(t)$ и $i(t)$ равно мгновенной мощности:

$$P(t) = u(t) \cdot i(t).$$

Исходя из этого соотношения и формул (П1.3б) и (П1.4б) легко получить выражения (П1.1) и (П1.2), принимая во внимание, что

$$W = \int P dt.$$

Займемся накопителями механической системы.

Энергия пружины

$$W_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{пр}}^2}{2k} = \frac{kx_{\text{пр}}^2}{2} = \frac{F_{\text{пр}}x_{\text{пр}}}{2}, \quad (\text{П1.5})$$

где $F_{\text{пр}}$ — сила, "деформирующая" пружину; $x_{\text{пр}}$ — деформация; k — коэффициент жесткости пружины.

Поэтому в качестве переменных состояния (в механике их называют обобщенными координатами) можно использовать либо силу $F_{\text{пр}}$, либо деформацию $x_{\text{пр}}$ (обычно используют деформацию).

Энергия поступательного движения тела

$$W_{\text{Т}} = \frac{mv_{\text{Т}}^2}{2} = \frac{I_{\text{Т}}^2}{2m} = \frac{I_{\text{Т}}v_{\text{Т}}}{2}, \quad (\text{П1.6})$$

где $v_{\text{Т}}$ — скорость тела; $I_{\text{Т}} = \int F_{\text{Т}} dt$ — импульс силы, "сообщивший" покоившемуся телу массы m скорость, равную $v_{\text{Т}}$.

Следовательно, в качестве переменных состояния можно использовать скорость тела или импульс силы (обычно используют скорость).

Поведение пружины приближенно описывают формулами

$$x_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{пр}}}{k} \quad (\text{П1.7a})$$

или

$$v_{\text{пр}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{dF_{\text{пр}}}{dt}. \quad (\text{П1.7б})$$

Проведение поступательно движущегося тела приближенно описывают формулами

$$I_{\text{Т}} = mv_{\text{Т}} \quad (\text{П1.8a})$$

или

$$F_{\text{Т}} = m \frac{dv_{\text{Т}}}{dt}. \quad (\text{П1.8б})$$

Отметим, что подобно конденсатору и индуктивной катушке пружина и инертное тело дуальны друг другу.

Поскольку мгновенная мощность в механике выражается формулой

$$P(t) = F(t)v(t),$$

воспользовавшись формулами (П1.76) и (П1.86), легко получить формулы (П1.5) и (П1.6).

Поведение диссипаторов обычно описывают в теории электрических цепей взаимосвязью напряжения и силы тока, а в механике — силы и скорости.

В линейном приближении формулы выглядят так:

$$u_R = Ri_R; \quad (\text{П1.9})$$

$$F_r = rv_r. \quad (\text{П1.10})$$

Источники (движения) в схеме замещения электрической цепи задают в виде источников напряжения или тока:

$$u_{\text{и}} = u_{\text{и}}(t); \quad (\text{П1.11})$$

$$i_{\text{и}} = i_{\text{и}}(t). \quad (\text{П1.12})$$

В расчетной схеме механической системы источниками движения служат источник силы или источник скорости:

$$F_{\text{и}} = F_{\text{и}}(t); \quad (\text{П1.13})$$

$$v_{\text{и}} = v_{\text{и}}(t). \quad (\text{П1.14})$$

Из изложенного ясно, что математическое описание поведения элементов электрической цепи и элементов механической системы одинаково, т. е. налицо **аналогичность** поведения элементов различной физической природы. Для удобства их сопоставления все величины и связывающие их формулы сведены в табл. П1.1.

Таблица П1.1

Электрическая цепь		Механическая система	
Напряжение	u	Сила	F
Сила тока	i	Скорость	v
Вольтсекундная площадь	σ	Импульс силы	I
Электрический заряд	q	Координата	x
Индуктивность	L	Масса	m
Емкость	C	Податливость	$1/k$
Поведение конденсатора	$q = Cu$ $i = Cdu/dt$	Поведение пружины	$x = F/k$ $v = \frac{1}{k} dF/dt$

Таблица П1.1 (окончание)

Электрическая цепь		Механическая система	
Поведение индуктивной катушки	$\sigma = Li$ $u = L di/dt$	Поведение инертного тела	$l = mv$ $F = m dv/dt$
Мощность	ui	Мощность	Fv
Энергия индуктивной катушки	$L i^2/2$	Кинетическая энергия	$m v^2/2$
Энергия конденсатора	$C u^2/2$	Потенциальная энергия	$k x^2/2$
Поведение резистора	$u = Ri$	Поведение демпфера	$F = rv$
Поведение источника	$u(t)$ $i(t)$	Поведение источника	$F(t)$ $v(t)$

Межсистемные аналогии

Пока, однако, неясно, распространяется ли аналогичность на системы. Судя по "энергетическому портрету" (см. рис. П1.1), общему для систем обоих типов, должна распространяться. Обсудим этот вопрос.

Структурными законами теории электрических цепей являются уравнения Кирхгофа (см. п. 8.5). Рассмотрим две типичные цепи, схемы замещения которых показаны на рис. П1.2.

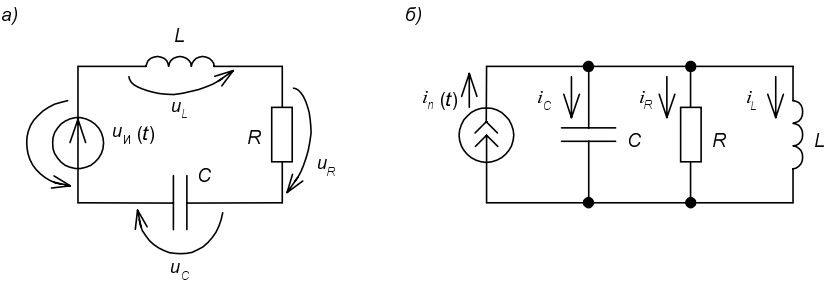


Рис. П1.2

В схеме на рис. П1.2, а сила тока для всех элементов одинакова, а второй закон Кирхгофа приводит к уравнению

$$u_L + u_R + u_C = u_u(t).$$

(П1.15)

Воспользовавшись формулами (П1.3а), (П1.4б) и (П1.9), заменим переменные u_L , u_R и u_C переменными d^2q/dt^2 ; dq/dt и q .

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = u_{\text{и}}(t). \quad (\text{П1.16})$$

В схеме на рис. П1.2, б для всех элементов напряжение одинаково, а первый закон Кирхгофа приводит к уравнению

$$i_C + i_R + i_L = i_{\text{и}}(t). \quad (\text{П1.17})$$

Воспользовавшись формулами (П1.3б), (П1.4а) и (П1.9), заменим переменные:

$$C \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{L} \sigma = i_{\text{и}}(t). \quad (\text{П1.18})$$

Сравнив уравнения (П1.16) и (П1.18), увидим, что с математической точки зрения они тождественны. Следовательно, схемы, представленные на рис. П1.2, аналогичны друг другу, точнее, дуальны (см. комментарий к формулам (П1.3) и (П1.4)).

Зададимся вопросом: есть ли механические законы, аналогичные законам Кирхгофа (П1.15) и (П1.17)? Ни в одном из известных мне учебников теоретической механики мы не найдем не только прямого ответа на этот вопрос, но даже самого вопроса. Между тем, исходя из того, что на электронных аналоговых вычислительных машинах уже более полувека успешно моделируют механические системы, такие законы должны быть. Фактически они, конечно, есть. Но в явном, незавуалированном, виде их почему-то не пишут. Убедимся в этом.

Во всех учебниках теоретической механики рассматривают задачу о движении системы, расчетная схема которой состоит из четырех элементов: источника силы $F(t)$, инерционного элемента массы m , упругого элемента с коэффициентом жесткости k и элемента вязкого трения (прототипом которого является демпфер) сопротивлением r (рис. П1.3). Приводят уравнение движения этой системы:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F(t). \quad (\text{П1.19})$$

Теперь воспользуемся формулами (П1.7а), (П1.8б) и (П1.10):

$$F_{\text{т}} + F_r + F_{\text{пр}} = F(t). \quad (\text{П1.20})$$

Данный результат легко проверить экспериментально, поместив в реальной системе датчики силы (являющиеся элементами автоматизированной измерительной системы) в места, отмеченные кружочками (см. рис. П1.3). Принципиально важно, что он определяется только структурой системы, т. е. не зависит от того, какие именно элементы (показанные на рис. П1.3

или другие) имеются в механической системе. Следовательно, **уравнение (П1.20) — один из структурных законов механики**. Если воспользоваться аналогиями, приведенными в табл. П1.1, окажется, что он подобен закону Кирхгофа для напряжений.

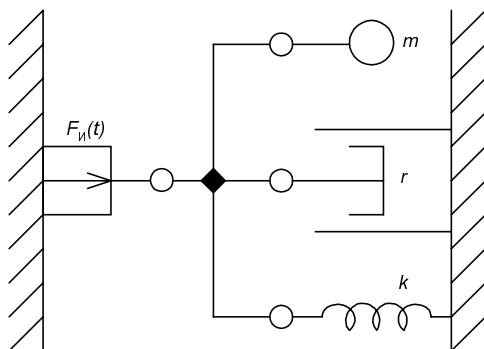


Рис. П1.3

Взяв механическую систему, расчетная схема которой показана на рис. П1.4 (кружками обозначены спидометры (измерители скорости)), мы обнаружим **второй структурный закон механики**:

$$v_1 + v_2 + v_3 = v(t). \quad (\text{П1.21})$$

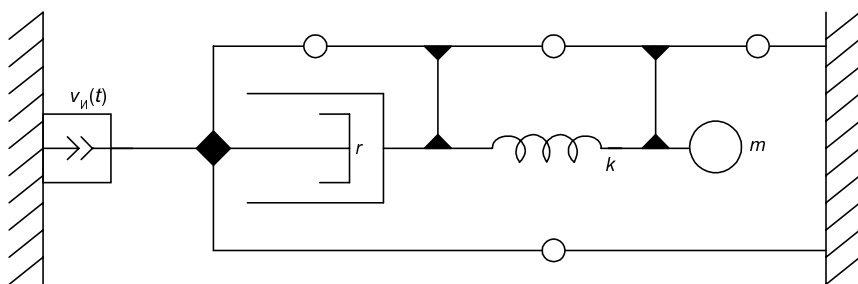


Рис. П1.4

Воспользовавшись компонентными законами (П1.6а), (П1.7б) и (П1.10), заменим в уравнении (П1.21) переменные v_1 , v_2 и v_3 переменными d^2I/dt^2 , dI/dt и I .

$$\frac{1}{k} \frac{d^2 I}{dt^2} + r \frac{dI}{dt} + \frac{1}{m} I = v(t). \quad (\text{П1.22})$$

Сравнив последнее уравнение с уравнением (П1.19), увидим, что механические системы, показанные на рис. П1.3 и рис. П1.4, дуальны друг другу.

Все сказанное здесь о структурных законах механики давно известно (см., например, [1—3]), но почему-то не попадает в учебники теоретической механики (не говоря уже об учебниках физики). Более того, многие авторы почему-то до сих пор считают второй закон Ньютона "основным законом механики" (в то время как он — компонентный закон, простейшая математическая модель тела, в которой учтена только его инертность). Поэтому уравнение (П1.19) часто пишут не так, а в форме "второго закона Ньютона":

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(t) - r \frac{dx}{dt} - kx.$$

Разумеется, для **удобства вычислений** члены уравнения можно переносить через знак равенства как угодно. Но **первоначальная запись** уравнения должна соответствовать физическому смыслу, представленному на рис. П1.1.

Таким образом, процессы в электрической цепи полностью аналогичны одномерному движению механической системы.

Обобщение

Возможно, кому-нибудь окажется полезным обобщение изложенного выше. Оно применимо как к рассмотренным системам, так и к другим, например, механической системе, которой свойственно вращательное движение.

1. Поведение накопителей описывают формулами

$$x_A = A \frac{dy_A}{dt}; \quad y_B = B \frac{dx_B}{dt},$$

где x и y — переменные, произведение которых равно мгновенной мощности:

$$x(t) \cdot y(t) = P(t);$$

A и B — параметры накопителей.

2. Величины y_A и x_B являются переменными состояния, т. к. они однозначно связаны с энергией накопителей (при нулевых начальных условиях имеем):

$$W_A = \int x_A y_A dt = A \int y_A \frac{dy_A}{dt} dt = \frac{A y_A^2}{2};$$

$$W_B = \int x_B y_B dt = B \int x_B \frac{dx_B}{dt} dt = \frac{B x_B^2}{2}.$$

3. Поведение диссипатора (Д) описывают взаимосвязью x_D и y_D :

$$f(x_D, y_D) = 0.$$

В случаях, когда применима линейная аппроксимация, эта связь приобретает вид:

$$y - Rx = 0, \quad \text{или} \quad y = Rx, \quad \text{или} \quad x = y/R,$$

где R — параметр, которым оценивают сопротивление диссипатора.

4. Поведение источника (И) задают в виде переменной, не зависящей от процессов внутри системы, — функции времени:

$$x_{\text{и}} = x_{\text{и}}(t) \quad \text{или} \quad y_{\text{и}} = y_{\text{и}}(t).$$

Ответы на вопросы

Теперь имеется возможность ответить на поставленные выше вопросы:

1. В тех случаях, когда допустимо пренебречь энергией накопителей, в мысленную модель системы не вводят соответствующие идеальные элементы — (емкостный и индуктивный — в схему замещения электрической цепи; инерционный и упругий — в расчетную схему механической системы). Значит, формулы (П1.36), (П1.46), (П1.76) и (П1.86), содержащие производные по времени, в структурные уравнения не попадают, и уравнения оказываются не дифференциальными, а алгебраическими.
2. *Переменные состояния* и *обобщенные координаты* — синонимы. Этими терминами обозначают переменные, однозначно связанные с энергией накопителей. Первый термин лучше, т. к. он является правильно ориентирующим.
3. Этот ответ приведен в ответе на вопрос 2.
4. Число переменных состояния равно количеству независимых накопителей. Независимыми называют накопители, которые не поддаются объединению методами формальных преобразований схем замещения (расчетных схем).
5. Термин *состояние системы* используют тогда, когда хотят охарактеризовать степень активности системы в предстоящих взаимодействиях. Состояние динамической системы в некоторый момент времени оценивают значением энергии накопителей в этот момент.
6. Выражение "энергия — функция состояния системы" лишено физического смысла.
7. Начальные условия — значения переменных состояния в момент времени, принятый за ноль.
8. Порядок дифференциального уравнения равен числу независимых накопителей (пояснение к этому пункту см. дальше).

9. Уравнения (П1.16), (П1.18), (П1.19) и (П1.22), с правой частью, не равной нулю, называют неоднородными. Они соответствуют наличию воздействия среды на изучаемую систему через источник (см. рис. П1.1). Если воздействие отсутствует, правые части упомянутых уравнений равны нулю. Такие уравнения называют однородными.

Комментарий к пункту 8. Рассмотрим схему на рис. П1.5. Она содержит **один** накопитель — C . Следовательно, состояние системы определяется значением **одной** переменной — напряжения u_C . Соответственно при решении задачи надо знать **одно** начальное условие — значение u_C в момент времени $t = 0$.

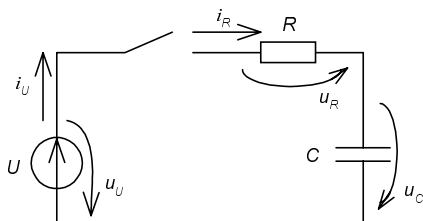


Рис. П1.5

Для замкнутого ключа составим дифференциальное уравнение. Структурные законы:

$$\begin{aligned} i_R &= i_C = i_U = i; \\ u_R + u_C &= u_U. \end{aligned} \quad (\text{П1.23})$$

Компонентные законы:

$$\begin{aligned} u_R &= Ri_R; \\ i_C &= C \frac{du_C}{dt}; \\ u_U &= U. \end{aligned}$$

Используя их, преобразуем уравнение (П1.23):

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{RC} = \frac{U}{RC}.$$

Согласно дефиниции порядка уравнения, предлагаемого математиками, это — уравнение первого порядка, что соответствует физическому смыслу.

Возьмем, однако, вместо u_C другую переменную — вольтсекундную площадь

$$\sigma_C = \int u_C dt.$$

Тогда получим уравнение

$$\frac{d^2\sigma_C}{dt^2} + \frac{1}{RC} \cdot \frac{d\sigma_C}{dt} = \frac{U}{RC},$$

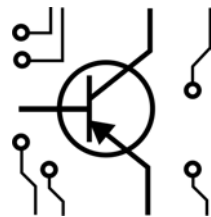
которое математики назовут уравнением второго порядка, что физическому смыслу противоречит.

По-видимому, надо изменить определение порядка дифференциального уравнения, принятое в математике. А именно, считать, что порядок уравнения равен разности порядков старшей и младшей производных, полагая саму функцию производной нулевого порядка. Представляется, что такое изменение формулировки соответствует идее, высказанной А. Пуанкаре столетие назад: когда математика приблизится к природе, "необходимо будет отбросить чисто словесные определения, которыми нельзя будет довольствоваться" ([4], с. 507—508).

Литература

1. Харкевич А. А. Электромеханические аналогии // Журнал технической физики, 1931, т. 1, вып. 2—3, с. 136—158.
2. Харкевич А. А. Теория электроакустических аппаратов — М.: Связьиздат, 1940, 364 с.
3. Дружинский И. А. Механические цепи. — Л.: Машиностроение, 1977, 238 с.
4. Пуанкаре А. О науке. — М.: Наука, 1990, 736 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Подключение источников питания и измерительных приборов

При практическом использовании транзисторных цепей и работе с ними необходимо учитывать особенности, обычно не упоминаемые в теории электрических цепей. Рассмотрим некоторые из них.

На рис. П2.1, *а* показана электрическая схема карманного фонарика. Зададимся вопросами: будет ли работать фонарик, если изменить полярность источника питания (рис. П2.1, *б*) или поменять местами батарейку и лампочку (рис. П2.1, *в*)? Человеку, мало-мальски знакомому с "классическими" электрическими цепями, оба вопроса покажутся надуманными. В самом деле, ни выключатель, ни лампочка не чувствительны к направлению тока. Поэтому полярность источника питания безразлична. Далее. От перемены мест слагаемых сумма не меняется. Следовательно, изменение положения элементов в контуре не скажется на законе Кирхгофа для напряжений, и схемы на рис. П2.1, *б*, *в* столь же работоспособны, что и исходная.

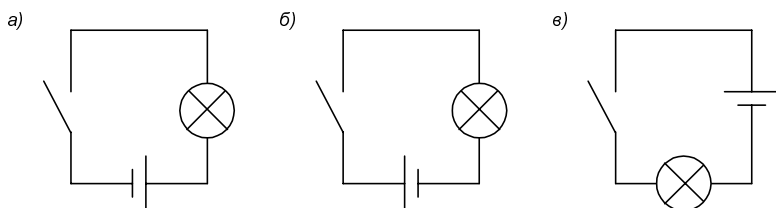


Рис. П2.1

Совсем иная ситуация в транзисторных цепях. Во-первых, транзисторы чувствительны к знаку тока и поэтому полярность источника питания имеет принципиальное значение. Во-вторых, транзисторные цепи отличаются тем, что они предназначены для усиления и преобразования сигналов не только почти постоянного тока (как в карманном фонарике), но и высокочастотных вплоть до миллиардов герц. В результате этого становятся существен-

ными те свойства, которые не имеют никакого значения при работе карманного фонарика и других обычных электротехнических устройств.

На рис. П2.2 показана схема последовательного УК с ОЭ, в которой изменено место включения источника питания (такой источник принято называть "подвешенным"). Полярность его включения правильная, но эту схему почти никогда не используют. Разберемся, почему.

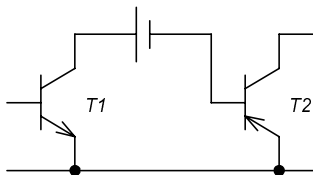


Рис. П2.2

Первая причина состоит в том, что такие схемы требуют для каждого УК иметь индивидуальный источник питания. Чтобы понять это, достаточно рассмотреть участок многокаскадного усилителя, состоящего из простейших однотипных усилительных каскадов (рис. П2.3, *а*). Между тем при ином расположении источника питания можно использовать один источник (рис. П2.3, *б*), что значительно дешевле. Во-вторых, сказывается еще одно не менее важное обстоятельство. В то время (см. рис. П2.3, *а*), когда напряжение $u_{\text{вх}}$ растет, выходное напряжение $u_{\text{КЭ1}}$ первого транзистора понижается. Следовательно, понижается потенциал всего источника питания ИП1 по отношению к другим предметам. При понижении $u_{\text{вх}}$ потенциал ИП1 растет. Таким образом, между ИП1 и другими предметами существует переменное электрическое поле, изменяющееся с частотой усиливаемого сигнала. Аналогично, но в противоположную сторону изменяется потенциал источника ИП2. Это эквивалентно включению конденсаторов, показанных на рис. П2.3, *а* штриховыми линиями. Чем выше частота усиливаемого сигнала, тем чаще изменяется поле и, следовательно, тем меньшая доля мощности усиливаемого сигнала приходится на создание ненужного ("паразитного") электрического поля. Это приводит к понижению верхней границы частоты усиливаемого сигнала. При усилении импульсов данный эффект проявляется в сильном увеличении времени нарастания и спада выходного напряжения (см. рис. 2.74 и комментарий к нему, включая формулу (10.14)).

На рис. П2.4 показаны временные диаграммы напряжения $u_{\text{КЭ1}}$ в случае нормального включенного (*а*) и подвешенного (*б*) источников питания, соответствующие одинаковому импульсу напряжения на входе (*в*).

Чем больше размеры подвешенных источников, тем больше "паразитные емкости" и, следовательно, тем ниже верхняя граница частоты усиливаемого сигнала и тем сильнее искажаются импульсы.

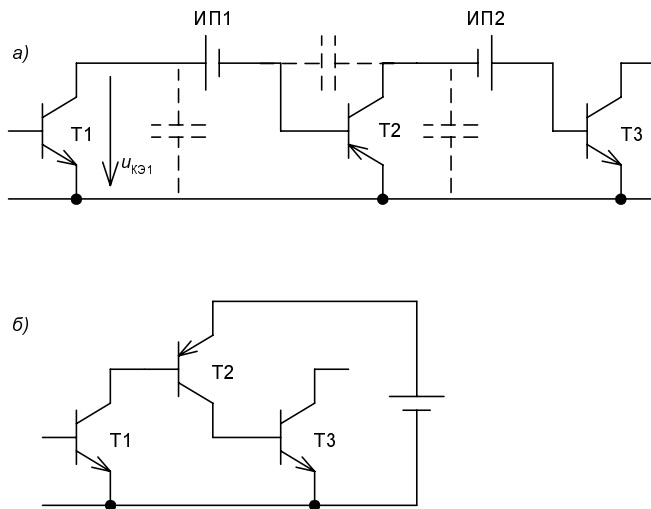


Рис. П2.3

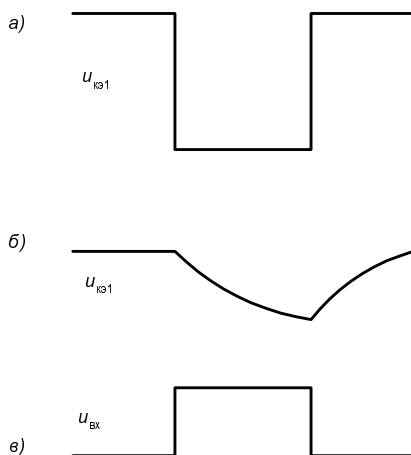


Рис. П2.4

Замечание

Если источником питания служит миниатюрная батарейка, а требуемая верхняя граница частоты усиливаемого сигнала не слишком высока, то усилитель с подвешенным источником питания работать будет и, в принципе, не исключено, что в каких-то специальных ("экзотических") случаях потребность в такой схеме может появиться. В качестве подвешенного источника питания можно использовать солнечный фотозлемент (фотогенератор). Но к нему надо постоянно

подводить свет. Сетевые же источники питания в качестве подвешенных непригодны.

Таким образом, как правило, полюса источников питания нельзя соединять с точками переменного потенциала, коими служат: база транзистора при включениях с ОЭ и ОК, коллектор — при включениях с ОЭ и ОБ, а также эмиттер — при включениях с ОБ и ОК.

Далее. Общий для нескольких УК источник питания **функционально** входит в состав каждого из них, но **конструктивно** он расположен вне усилительных каскадов. Ввиду этого обычно усилительным каскадом называют то, что остается после удаления источника питания. В результате может создаться впечатление, будто у такого ("неполного") УК три пары выводов: пара входных, пара выходных и пара — для подачи питания (рис. П2.5).

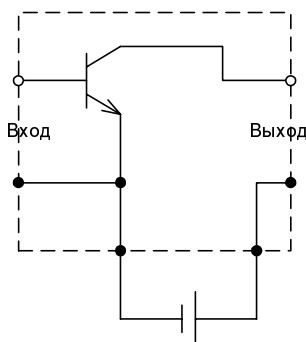


Рис. П2.5

Однако в действительности это не так, ибо провода питания используют также для передачи сигнала. В результате этого обычно УК имеет три или (чаще) четыре вывода (некоторые примеры показаны на рис. П2.6).

При практической работе с электронными устройствами в лаборатории важно иметь в виду еще один аспект, связанный с точками постоянного и переменного потенциала. На схеме ничто не мешает выбрать направление отсчета напряжения как угодно (u_1 или u_2 на рис. П2.7, а). Однако направлению стрелки на схеме соответствует то или иное включение измерительного прибора, например, осциллографа (рис. П2.7, б, в). А это совсем не безразлично. Дело в том, что любой измерительный прибор — материальный объект. Он **взаимодействует** с изучаемым устройством, т. е. не только изменяет свое состояние под влиянием процессов в последнем, но и оказывает воздействие на него.

Воздействия измерительных приборов по интенсивности можно разделить на слабые, средние и сильные. Слабыми назовем такие, которые влияют в преде-

лах допустимой неопределенности (погрешности) измерений и, следовательно, ими можно пренебречь. Средними — требующие вносить поправки в результат измерения, но на качественное своеобразие процессов не влияющие. Сильными — изменяющие характер процесса (например, при подключении измерительного прибора могут прекратиться колебания автогенератора). Ясно, что первые наиболее желательны, а последние недопустимы.

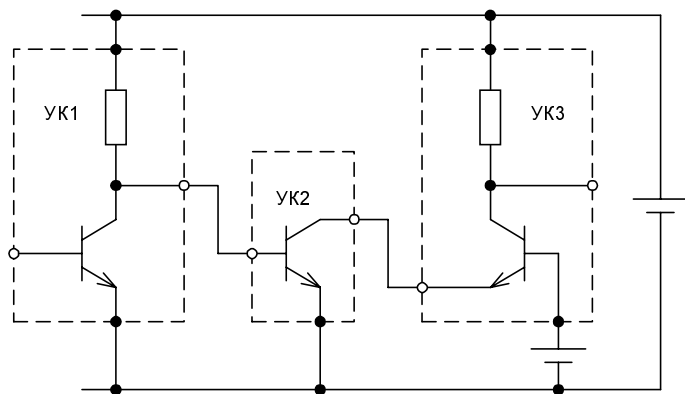


Рис. П2.6

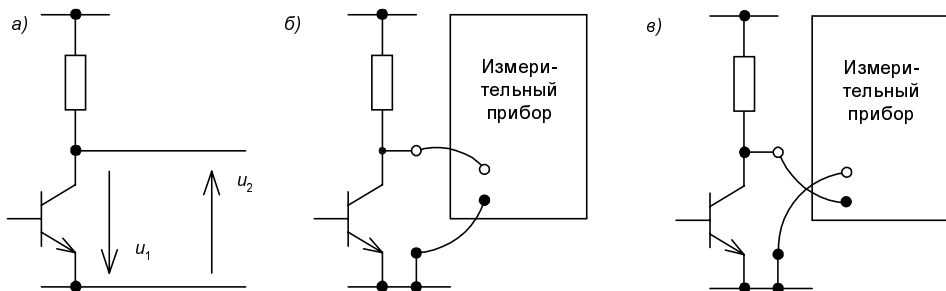


Рис. П2.7

В большинстве электронных измерительных приборов один из входных выводов соединен с его металлическим корпусом. В результате этого подключение прибора, как показано на рис. П2.7, в, эквивалентно присоединению конденсатора емкостью несколько тысяч пикофарад, что очень сильно исказит картину наблюдаемого процесса (так, как это показано на рис. П2.4, б).

В ряде случаев необходимо наблюдать временную диаграмму тока, например, тока базы транзистора I_B (рис. П2.8, а). Электронный осциллограф — прибор, реагирующий на электрическое, а не магнитное поле. Следовательно

но, "ток надо преобразовать в напряжение". Так как $u = Ri$, это легко сделать, включив высококачественный резистор последовательно с выводом базы (рис. П2.8, б). Однако оба его вывода — точки переменного потенциала. Поэтому присоединение входа осциллографа, как того требует стрелка на рис. П2.8, б, эквивалентно включению конденсатора параллельно промежутку Б—Э транзистора, что сильно исказит осциллограмму.

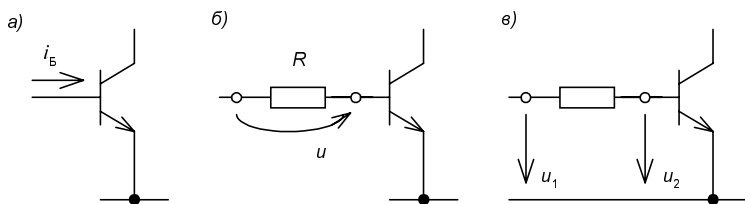


Рис. П2.8

В таких случаях надо использовать осциллограф с дифференциальным входом. У него два входа, оба с малой "паразитной емкостью", а усилитель реагирует на разность напряжений между ними $u = u_1 - u_2$ согласно схеме, показанной на рис. П2.8, в.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гомоюнов К. К. Автоматизированная цифровая информационная система "Кварц" // Стремительный взлет. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1995, с. 28—31.
2. Гомоюнов К. К. Концепции и вычисления // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996, с. 219—237.
3. Гомоюнов К. К. Совершенствование преподавания технических дисциплин: Методологические аспекты анализа учебных текстов. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1983, 206 с.
4. Гомоюнов К. К. Совершенствование преподавания общенаучных и технических дисциплин: Методологические аспекты анализа и построения учебных текстов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 1993, 252 с.
5. Гомоюнов К. К. Врачевание знаний. По страницам учебников физики: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996, 128 с.
6. Лебедева И. С., Лебедев А. А. Структурные и организационно-методические аспекты проблемного обучения в техническом вузе. — Москва — Уфа: Госкомобр., 1988, с. 12—28 (Серия: Новые технологии обучения в высшей школе).
7. Лыпарь Ю. И. Автоматизация проектирования избирательных усилителей и генераторов. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1983, 164 с.
8. Тринг М., Лейтуэйт Э. Как изобретать? — М.: Мир, 1980, 272 с.
9. Андреев Н. Н. Наука в моей жизни // Физики о себе. — Л.: Наука, 1990, с. 175—177.
10. Представление и использование знаний / Под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. — М.: Мир, 1989, 220 с.
11. Фейнберг Е. Утрачивается ли наглядность в физике? // Знание — сила, 1983, август, с. 31—33.
12. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. — М.: Мир, 1988, 583 с.

Предметный указатель

А

Автогенератор 191
Активная область 157, 182
Аналоговые элементы 147
Аппроксимация 20, 92

Б

База 29, 129
Базисные схемы усилительных каскадов 31
Биполярный транзистор 29, 128
Большая интегральная схема 9
Большой сигнал 75

В

Вентиль 162
 идеальный 86, 162
Ветвь электрической цепи 68
Вольт-амперная характеристика 45, 65, 72
Вольт-секундная площадь 59
Временная диаграмма 102
Вход:
 транзистора 30, 39
 управляющего элемента 29
 усилительного каскада 39
 усилителя 23
Входной двухполюсник 33
Вывод:
 псевдообщий 38
 элемента электрической цепи 23, 29, 64, 129

Выход:

 в эфир 8
 транзистора 31
 управляющего элемента 29
 усилительного каскада 39
 усилителя 23

Г

Генератор 191
 релаксационный 192, 196
Герменевтический круг 15
Графическая интерполяция 140
Графический метод анализа 76
Гуманитарные науки 12

Д

Двухполюсник 64
 входной 33
 зависимый 139
 идеальный 84
 ненакапливающий 104, 108
 параллельное соединение 68
 последовательное соединение 68
 управляемый 73
Делитель напряжения 99
Дельта-функция 117
Дефиниция 18
Динамическая система 49, 210
Динамический:
 накопитель 49, 209
 режим 49
 режим работы транзистора 141
Диссипатор 49, 209
Дифференциальное сопротивление 73, 82

Дифференциальные параметры 135
Дуальность 127, 212

Е

Единичная функция 117
Емкостный элемент 85
Емкость паразитная 141

З

Зависимый:
 двухполюсник 139
 источник напряжения 133, 137
 источник тока 133, 138
Заземление 35
Закон 21
 Кирхгофа 62
 компонентный 15
 структурный 15
Закоротка 85
Запоминающий элемент 191
Затвор 144

И

Идеальный:
 двухполюсник 84
 вентиль 86, 162
 ключ 86
Изображение 117
Изображающая точка 47, 102, 103
Инверсное включение транзистора 129
Индуктивная катушка 49, 65
Индуктивный элемент 85
Инерционный элемент 210
Инжекция 129
Интегральная микросхема 9
Интуиция 9, 11
Искусственная наглядность 13, 21
Исток 144
Источник 49
 движения 209
 напряжения 85

питания 24
сигнала 23
тока 85

К

Канал 144
Квазистатический режим 49
Кисть электрической цепи 68
Классификационное определение 18
Коллектор 29, 129
 общий 36
Коммуникация 16
Компонент 14
Компонентные законы 15
Конденсатор 49, 65
Контекстуальное определение 19
Контур электрической цепи 63
Коэффициент:
 обратной связи 189
 передачи мощности 25, 183
 передачи напряжения 183
 передачи тока 183
 передачи тока базы 131
 передачи тока эмиттера 140
Кусочно-линейная аппроксимация
 характеристик 88, 132

М

Малосигнальная схема замещения
 транзистора 135
Малосигнальные параметры
 транзистора 135
Малый сигнал 75
Мгновенная мощность 65
Межкаскадные связи 34
Метод:
 восхождение от абстрактного к
 конкретному 204
 малого сигнала 80
 операторный 116, 117
Механизмический подход 15
Микроминиатюризация 9
Микросхема интегральная 9
Микроэлектроника 9

Мир вещей, мир идей и мир знаков 16
Многозначность терминов 17
Многокаскадный усилитель 26
Многополюсник 64
Многэмиттерный транзистор 130
Мощность 26
 мгновенная 65
Мультивибратор 196
Мысленная модель 20

Н

Нагрузка 23
Накопитель 100, 101, 212
 динамический 49, 209
 статический 49, 209
Наноэлектроника 9
Направления отсчета напряжения
 и тока 60
Начальные условия 219
Негатрон 73
Ненакапливающий двухполюсник 104,
 108
Неоднородное дифференциальное
 уравнение 220
Неосознаваемая модель мира 11
Номинальное определение 19
Нормальное включение транзистора 129

О

Область:
 активная 157, 182
 насыщения 157, 182
 отсечки 157, 182
Образное мышление 21
Обратная связь 189
 отрицательная 189, 193
 положительная 189, 190
Обратное смещение р-п-перехода 129
Общая база 36
Общий:
 вывод транзистора 34, 37
 коллектор 36
 эмиттер 36
Объективирование 16

Объективная реальность 16
Однокаскадный усилитель 24
Однородные дифференциальные
 уравнения 220
Операторный метод 116, 117
Операциональное определение 18
Определение через объем понятия 18
Оригинал 117
Остенсивное определение 18
Осциллограф 46
Отрицательная обратная связь 189, 193
Отрицательное сопротивление 73

П

Падающий участок характеристики 73,
 114
Паразитная емкость 141
Параллельное соединение
 двухполюсников 68
Переменная составляющая 80
Переменные состояния 49, 211
Переходный процесс 100
Печатная плата 8
Поглощение элемента источником 94
Подсистема 14
Полевой транзистор 144
Полносигнальная схема замещения
 транзистора 132
Положительная обратная связь 189,
 190
Полупроводниковая электроника 7
Полюс элемента электрической цепи 64
Понятие 12, 17, 18
Порядок дифференциального
 уравнения 219
Последовательное соединение
 двухполюсников 68
Постоянная:
 времени 106
 времени коэффициента передачи
 тока базы 144
 времени коэффициента передачи
 тока эмиттера 142
 составляющая 80

Потокосцепление 59
Правила знаков 60
Правило муравья 30
Предмет мысли 16
Приемник 23
Принцип суперпозиции 99
Принципиальная электрическая
схема 58
Проводимость 64
Прозрачный ящик 15
Промышленная электроника 8
Прямое смещение р-п-перехода 129
Псевдообщий вывод 38
"Птичий язык" 20

Р

Радио 8
Радиотехника 8
Радиоэлектроника 7, 8
"Размножение":
источника напряжения 95
источника тока 95
Разрыв 85
Реальное определение 19
Режим:
большого сигнала 75, 158
динамический 49
квазистатический 49
малого сигнала 75, 158
переключения 75, 135, 158
постоянного тока 49
работы статический 49, 72, 149
Резистивный элемент 53, 85
Резистор 64
Релаксационный генератор 192, 196

С

Семейство характеристик 74
Сечение цепи 62
Сила тока 59
Система 14, 209
динамическая 49, 210
функциональная 11
Системный подход 14

Сопротивление дифференциальное 73, 82
Состояние динамической системы 49, 211, 219
Способность к научному пониманию 14
Статические характеристики транзистора 130
Статический:
накопитель 49, 209
режим работы 49, 72, 149
Сток 144
Структурирование схем 92
Структурные законы 15
Субъективная (психическая) реальность 16
Схема замещения 84, 101

Т

Теорема:
Миллмана 99
Тевенина—Нортонa 96
Теория электрических цепей 57
Термин 17
Терминоведение 17
Тирания формы 19
Точка:
изображающая 47, 102, 103
переменного потенциала 39
постоянного потенциала 39
Траектория движения изображающей точки 47
Транзистор 29, 67
биполярный 29, 128
динамический режим работы 141
инверсное включение 129
малосигнальные параметры 135
малосигнальная схема замещения 135
многоэмиттерный 130
нормальное включение 129
общий вывод 34, 37
униполярный 144
полевой 144
полносигнальная схема замещения 132
статические характеристики 130

Транзисторные цепи 7, 147

Трехполюсник 64, 73

Туннельный диод 112

У

Узел электрической цепи 67

Униполярный транзистор 144

Управляемый двухполюсник 73

Управляющий элемент 24

Упругий элемент 210

Уравнение:

 неоднородное дифференциальное 220

 однородное дифференциальное 220

Усиление 24

Усилитель 23

 многокаскадный 26

 мощности 183

 напряжения 183

 однокаскадный 24

 тока 183

Усилительный каскад 24, 26

Условные графические обозначения 29, 58

Ф

Феноменологический подход 15

Физическая электроника 7

Функциональная система 11

Функция:

 единичная 117

 Дирака 117

 Хевисайда 117

 экспоненциальная 106, 111

Х, Ц, Ч

Характеристика передачи напряжения 153, 158

Цифровые элементы 147

Черный ящик 15

Э

Эквивалентные:

 преобразования схем 93

 схемы 84, 96, 97

Эквивалентный 84

Экспоненциальная функция 106, 111

Экстракция 130

Электрическая цепь 27, 57

 узел 67

Электроника 7

 полупроводниковая 7

 промышленная 8

 физическая 7

Электронные цепи 7

Элемент 14

 аналоговый 147

 емкостный 85

 запоминающий 191

 индуктивный 85

 инерционный 210

 отрицательной резистивности 86

 резистивный 53, 85

 управляющий 24

 упругий 210

 цифровой 147

 электрической цепи 64

Эмиттер 29, 129

 общий 36

Эмиттерный повторитель 179

Энергетические соотношения 65