

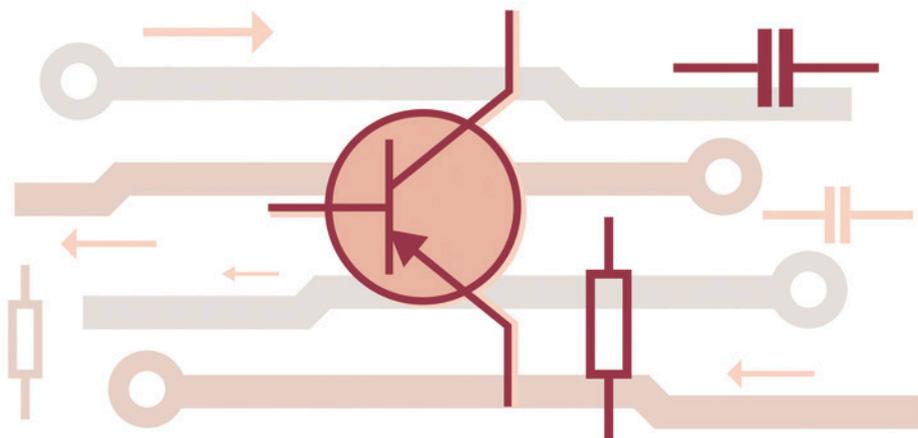
# ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЦЕПИ

*Биполярные транзисторы*



*Базисные схемы  
усилительных каскадов*

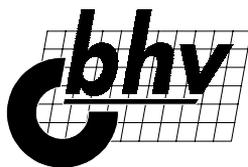
*Межкаскадные связи*



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,<br/>Натальи Смирновой</i> |
| Корректоры:           | <i>Александр Моносов,<br/>Наталья Першакова</i> |
| Дизайн обложки        | <i>Игоря Цырульниковца</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 70×100<sup>1/16</sup>. 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

|                                                                                                                            |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Глава 1. Качественные аспекты</b> .....                                                                                 | <b>7</b> |
| § 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       |

|                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Глава 2. Фрагменты теории электрических цепей.....</b>                                                | <b>57</b> |
| § 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<br>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<br>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<br>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       |

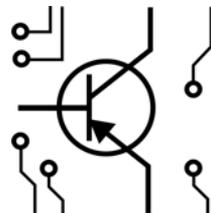
|                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 3. Количественные аспекты .....</b>                                           | <b>147</b> |
| § 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<br>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        |
| <b>Послесловие. Метод восхождения от абстрактного к конкретному .....</b>              | <b>205</b> |
| <b>Приложение 1. Динамические системы .....</b>                                        | <b>207</b> |
| Состав динамических систем .....                                                       | 209        |
| Межэлементные аналогии .....                                                           | 211        |
| Межсистемные аналогии .....                                                            | 215        |
| Обобщение .....                                                                        | 218        |
| Ответы на вопросы .....                                                                | 219        |
| Литература .....                                                                       | 221        |
| <b>Приложение 2. Подключение источников питания<br/>и измерительных приборов .....</b> | <b>223</b> |
| <b>Литература .....</b>                                                                | <b>229</b> |
| <b>Предметный указатель .....</b>                                                      | <b>230</b> |

# 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, [1]), 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 цепях<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> 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.

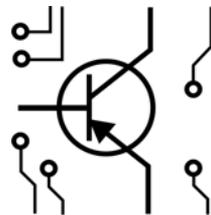
□ В области методической:

- 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 изготовляли 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 припаивание 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  $1 \text{ мм}^2$ ) 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  $1 \text{ см}^2$  миллионы транзисторов, т. е. линейные размеры транзисторов уменьшились до единиц микрометра ( $10^{-6} \text{ м}$ ).

Сравнительно недавно появился термин *нанозлектроника*. По аналогии с термином *микроэлектроника* можно подумать, что так называют интегральные микросхемы, размеры компонентов которых составляют порядка  $10^{-9} \text{ м}$ . 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]).

Задумавшись 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 удается 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?

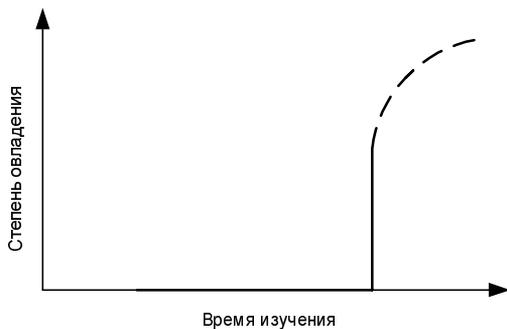


Рис. 1.1

**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), языковедение, 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 десятилетия 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 целого<sup>1</sup>. 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  $u = Ri$ ).

---

<sup>1</sup> Герменевтика — наука о понимании и толковании текстов.

Чтобы помочь студентам преодолеть "комплекс неполноценности", вызванный ложной мыслью, будто все надо знать механизмически, 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". Составим 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 думам" 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. Желающим 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 наглядна — **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 (большой 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, звукосниматель, 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.

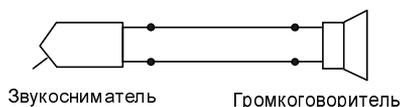


Рис. 1.2

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).

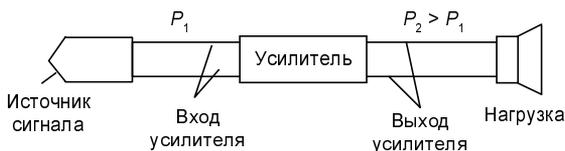


Рис. 1.3

**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.

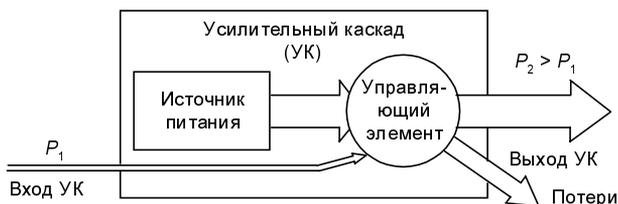


Рис. 1.5

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.

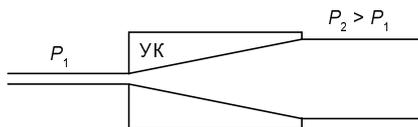


Рис. 1.6

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