

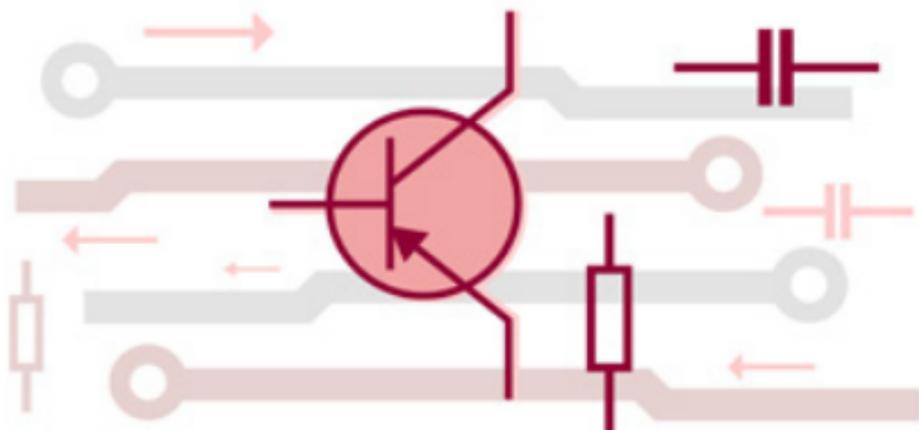
# ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЦЕПИ

*Биполярные транзисторы*



*Базисные схемы  
усилительных каскадов*

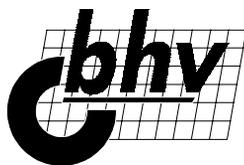
*Межкаскадные связи*



**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

УДК 681.3.06

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, Наталья Першакова</i>
Дизайн обложки	<i>Игоря Цырульникова</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 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

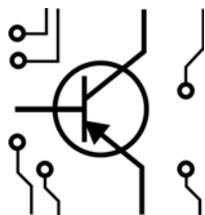
<b>Глава 3. Количественные аспекты .....</b>	<b>147</b>
§ 12. Общие соображения .....	147
12.1. Аналоговые и цифровые элементы .....	147
12.2. Подход к анализу статического режима .....	149
§ 13. Статический режим усилительного каскада с ОЭ.....	151
13.1. Ожидаемый вид ХПН .....	153
13.2. Построение ХПН графическим методом.....	153
13.3. Область 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
<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 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  $R1$ ". 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  $R1$ ".
- 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 различие 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.

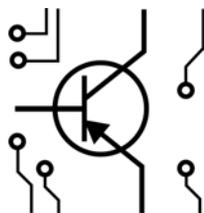
□ В области методической:

- 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 Сорозкому, 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 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  $1 \text{ мм}^2$ ) 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 *наноэлектроника*. 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 *наноэлектроника* 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 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].