

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Нас окружают разнообразные цифровые устройства: компьютеры, смартфоны, планшеты и т. п. И «последний оплот» аналоговой техники — телевидение, тоже недавно перешло на цифровой формат. Почему же цифровые схемы получили такое развитие? Каковы принципы их действия и как их проектируют? В этой книге наглядно, без сложных формул алгебры логики, изложены основы проектирования цифровых схем.

Цифровые схемы очень просты. Это — мир, в котором нет ничего, кроме 0 и 1. Также просто устроены их «кирпичики» — логические элементы. В главе 1 я познакомлю вас с цифровыми схемами, окружающими нас в повседневной жизни, в главе 2 объясню, почему они так быстро развились и вытеснили аналоговую технику, в главе 3 опишу простые и доступные каждому методы проектирования схем комбинационной логики, в которых состояние выходов определяется только текущим состоянием входов. Глава 4 посвящена упрощению схем. Преобразование схем с помощью алгебры логики — это самый сложный раздел университетского курса, но здесь я познакомлю вас с интуитивно понятными методами, доступными даже неискущённым в математике читателям. В главе 5 речь пойдёт о проектировании элементов памяти и схем последовательной логики, а в заключение вы узнаете о новейших методах проектирования схем: языках описания аппаратуры, о высокоуровневом синтезе и др.

Формат манги лучше, чем обычная книга, подходит для описания мира цифровых схем, наполненного графикой: таблицами истинности, чертежами логических схем, картами Карно, диаграммами состояний и т. п. Материал изложен по возможности простым языком, но при этом описано и внутреннее устройство логических схем на основе множества примеров проектирования, а разделы «Дополнительная информация» содержат также знания довольно высокого уровня о современных технологиях проектирования и др. Надеюсь, что эта манга будет полезной как для интересующихся электроникой, так и для людей с другой специализацией, занятых в этой области.

В работе над книгой мне очень помогли художник Мэгуро Кодзи и ответственная за оформление г-жа Савада Савако, предложив такие наглядные рисунки и глубокие примеры, каких ещё не было в учебниках по цифровой технике. Хочу поблагодарить также коллектив издательства Ohmsha за предоставленную возможность взяться за перо и за ценные советы, которые очень помогли мне в работе.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Глава 1

### ЧТО ТАКОЕ ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ?..... 1

- Цифровые интегральные схемы..... 21
- Программируемая пользователем вентильная матрица..... 22
- Объяснение терминов главы 1..... 24

## Глава 2

### ЦИФРОВЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ СХЕМЫ..... 25

#### 1. Цифровая и аналоговая техника..... 26

- От аналоговых схем к цифровым..... 26
- Представление об аналоговой и цифровой технике..... 28

#### 2. Почему цифровые схемы победили?..... 33

- Что такое логические схемы?..... 33
- Логические вентили работают просто..... 35
- Цифровые схемы побеждают числом!..... 37
- В чём преимущество цифровых схем?..... 39
- Проектировать цифровые схемы — просто!..... 44
- Что такое алгебра логики?..... 49
- Объяснение терминов главы 2..... 52



## Глава 3

### **СТРОИМ КОМБИНАЦИОННУЮ СХЕМУ** ..... 53

- 1. Таблица истинности, нотация MIL** ..... **54**
  - Мажоритарные цифровые схемы ..... 54
  - Строим таблицу истинности из L и H ..... 58
  - Что такое нотация MIL? ..... 64
  - Активный низкий и активный высокий ..... 68
  - Законы де Моргана ..... 72
  - Базовые логические вентили в нотации MIL ..... 75
- 2. Строим мажоритарную схему** ..... **78**
  - Строим схему по таблице истинности (порядок проектирования ДНФ) ..... 79
  - Что такое КМОП? ..... 85
  - Принцип работы полевого МОП-транзистора ..... 88
  - Объяснение терминов главы 3 ..... 91

## Глава 4

### **КАК УПРОСТИТЬ СХЕМУ?** ..... **93**

- 1. Используем карты Карно** ..... **94**
  - Нерациональные схемы ..... 94
  - Исследуем карту Карно ..... 98
  - Выделяем группы единиц ..... 102
  - Важные моменты выделения групп ..... 106
  - Усложняем задачу выбора ресторана ..... 108
- 2. Безразличное состояние** ..... **111**
  - Идентифицируем длинные месяцы ..... 111
  - Десятичные и двоичные числа ..... 114
  - Проектируем схему идентификации длинных месяцев ..... 118
  - Безразличное состояние ..... 120

<b>3. А если выходов несколько?</b> .....	<b>124</b>
• Объединяем выходы .....	125
• Проектируем схему индикатора электронного кубика .....	129
• Сумматоры и вычитатели .....	137
• Объяснение терминов главы 4 .....	143

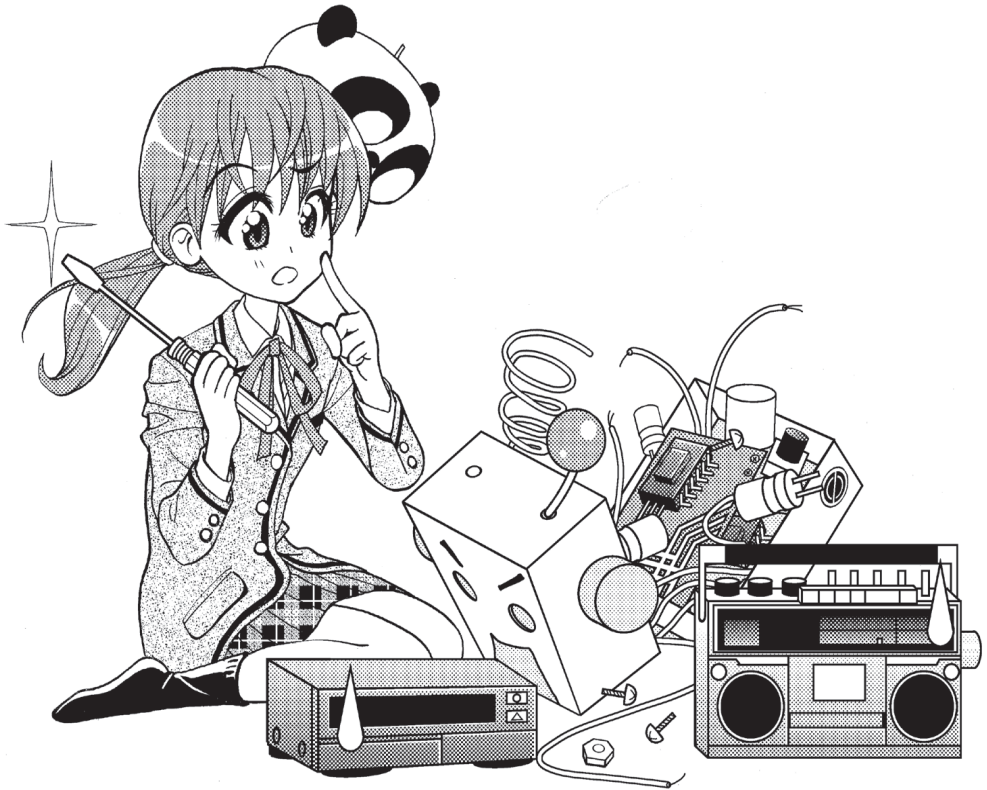
## **Глава 5**

### **СТРОИМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ .....**

<b>1. Что такое последовательные схемы?</b> .....	<b>146</b>
• У последовательных схем есть память .....	148
<b>2. D-триггеры</b> .....	<b>153</b>
• Триггер — это качели .....	153
• D-триггер и тактовый сигнал .....	155
• Что такое регистр? .....	167
<b>3. Проектируем электронный кубик</b> .....	<b>171</b>
• Электронный кубик — последовательная схема .....	171
• (1) Чертим диаграмму состояний .....	174
• (2) Назначаем состояниям двоичные числа .....	177
• (3) Проектируем комбинационную схему .....	181
• Устройство D-триггера .....	187
• Различные триггеры .....	190
• Объяснение терминов главы 5 .....	193
<b>Послесловие. Проектирование цифровых схем с помощью HDL</b> .....	<b>208</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>211</b>
<b>Предметный указатель</b> .....	<b>212</b>

# ГЛАВА 1

## ЧТО ТАКОЕ ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ?



# ПРЕДИСЛОВИЕ

Нас окружают разнообразные цифровые устройства: компьютеры, смартфоны, планшеты и т. п. И «последний оплот» аналоговой техники — телевидение, тоже недавно перешло на цифровой формат. Почему же цифровые схемы получили такое развитие? Каковы принципы их действия и как их проектируют? В этой книге наглядно, без сложных формул алгебры логики, изложены основы проектирования цифровых схем.

Цифровые схемы очень просты. Это — мир, в котором нет ничего, кроме 0 и 1. Также просто устроены их «кирпичики» — логические элементы. В главе 1 я познакомлю вас с цифровыми схемами, окружающими нас в повседневной жизни, в главе 2 объясню, почему они так быстро развились и вытеснили аналоговую технику, в главе 3 опишу простые и доступные каждому методы проектирования схем комбинационной логики, в которых состояние выходов определяется только текущим состоянием входов. Глава 4 посвящена упрощению схем. Преобразование схем с помощью алгебры логики — это самый сложный раздел университетского курса, но здесь я познакомлю вас с интуитивно понятными методами, доступными даже неискущённым в математике читателям. В главе 5 речь пойдёт о проектировании элементов памяти и схем последовательной логики, а в заключение вы узнаете о новейших методах проектирования схем: языках описания аппаратуры, о высокоуровневом синтезе и др.

Формат манги лучше, чем обычная книга, подходит для описания мира цифровых схем, наполненного графикой: таблицами истинности, чертежами логических схем, картами Карно, диаграммами состояний и т. п. Материал изложен по возможности простым языком, но при этом описано и внутреннее устройство логических схем на основе множества примеров проектирования, а разделы «Дополнительная информация» содержат также знания довольно высокого уровня о современных технологиях проектирования и др. Надеюсь, что эта манга будет полезной как для интересующихся электроникой, так и для людей с другой специализацией, занятых в этой области.

В работе над книгой мне очень помогли художник Мэгуро Кодзи и ответственная за оформление г-жа Савада Савако, предложив такие наглядные рисунки и глубокие примеры, каких ещё не было в учебниках по цифровой технике. Хочу поблагодарить также коллектив издательства Ohmsha за предоставленную возможность взяться за перо и за ценные советы, которые очень помогли мне в работе.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Глава 1

### ЧТО ТАКОЕ ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ?..... 1

- Цифровые интегральные схемы..... 21
- Программируемая пользователем вентильная матрица..... 22
- Объяснение терминов главы 1..... 24

## Глава 2

### ЦИФРОВЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ СХЕМЫ..... 25

#### 1. Цифровая и аналоговая техника..... 26

- От аналоговых схем к цифровым..... 26
- Представление об аналоговой и цифровой технике..... 28

#### 2. Почему цифровые схемы победили?..... 33

- Что такое логические схемы?..... 33
- Логические вентили работают просто..... 35
- Цифровые схемы побеждают числом!..... 37
- В чём преимущество цифровых схем?..... 39
- Проектировать цифровые схемы — просто!..... 44
- Что такое алгебра логики?..... 49
- Объяснение терминов главы 2..... 52



## Глава 3

### **СТРОИМ КОМБИНАЦИОННУЮ СХЕМУ** ..... 53

- 1. Таблица истинности, нотация MIL** ..... **54**
  - Мажоритарные цифровые схемы ..... 54
  - Строим таблицу истинности из L и H ..... 58
  - Что такое нотация MIL? ..... 64
  - Активный низкий и активный высокий ..... 68
  - Законы де Моргана ..... 72
  - Базовые логические вентили в нотации MIL ..... 75
- 2. Строим мажоритарную схему** ..... **78**
  - Строим схему по таблице истинности (порядок проектирования ДНФ) ..... 79
  - Что такое КМОП? ..... 85
  - Принцип работы полевого МОП-транзистора ..... 88
  - Объяснение терминов главы 3 ..... 91

## Глава 4

### **КАК УПРОСТИТЬ СХЕМУ?** ..... **93**

- 1. Используем карты Карно** ..... **94**
  - Нерациональные схемы ..... 94
  - Исследуем карту Карно ..... 98
  - Выделяем группы единиц ..... 102
  - Важные моменты выделения групп ..... 106
  - Усложняем задачу выбора ресторана ..... 108
- 2. Безразличное состояние** ..... **111**
  - Идентифицируем длинные месяцы ..... 111
  - Десятичные и двоичные числа ..... 114
  - Проектируем схему идентификации длинных месяцев ..... 118
  - Безразличное состояние ..... 120



<b>3. А если выходов несколько?</b> .....	<b>124</b>
• Объединяем выходы .....	125
• Проектируем схему индикатора электронного кубика .....	129
• Сумматоры и вычитатели .....	137
• Объяснение терминов главы 4 .....	143

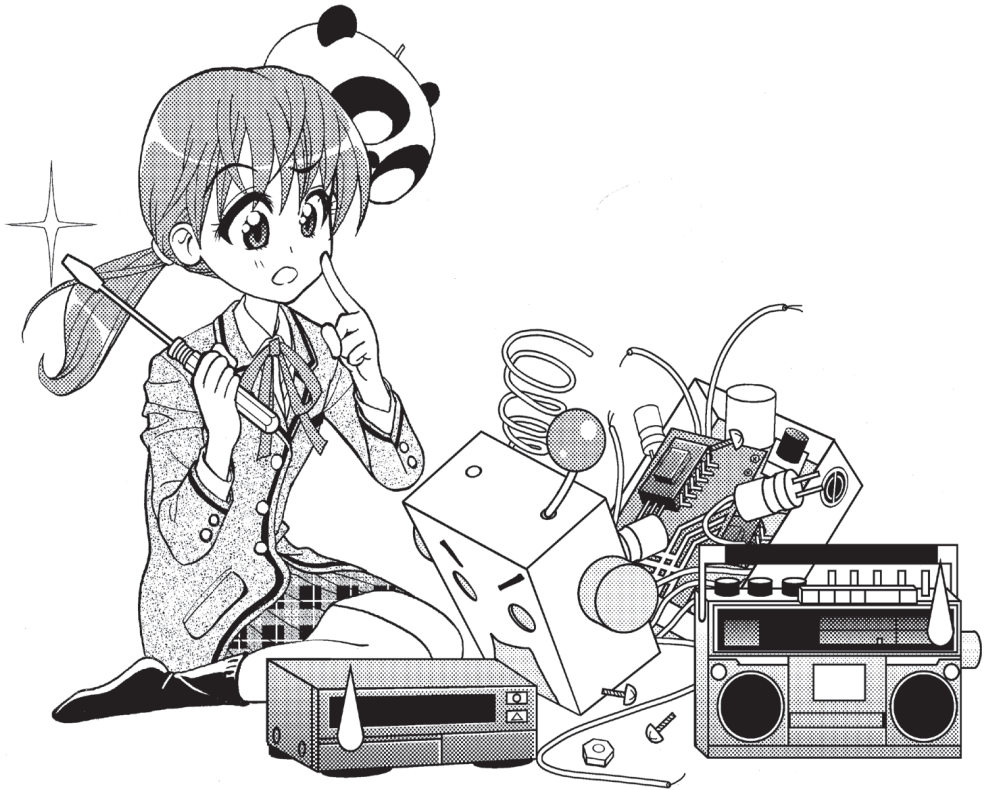
## **Глава 5**

### **СТРОИМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ .....**

<b>1. Что такое последовательные схемы?</b> .....	<b>146</b>
• У последовательных схем есть память .....	148
<b>2. D-триггеры</b> .....	<b>153</b>
• Триггер — это качели .....	153
• D-триггер и тактовый сигнал .....	155
• Что такое регистр? .....	167
<b>3. Проектируем электронный кубик</b> .....	<b>171</b>
• Электронный кубик — последовательная схема .....	171
• (1) Чертим диаграмму состояний .....	174
• (2) Назначаем состояниям двоичные числа .....	177
• (3) Проектируем комбинационную схему .....	181
• Устройство D-триггера .....	187
• Различные триггеры .....	190
• Объяснение терминов главы 5 .....	193
<b>Послесловие. Проектирование цифровых схем с помощью HDL</b> .....	<b>208</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>211</b>
<b>Предметный указатель</b> .....	<b>212</b>

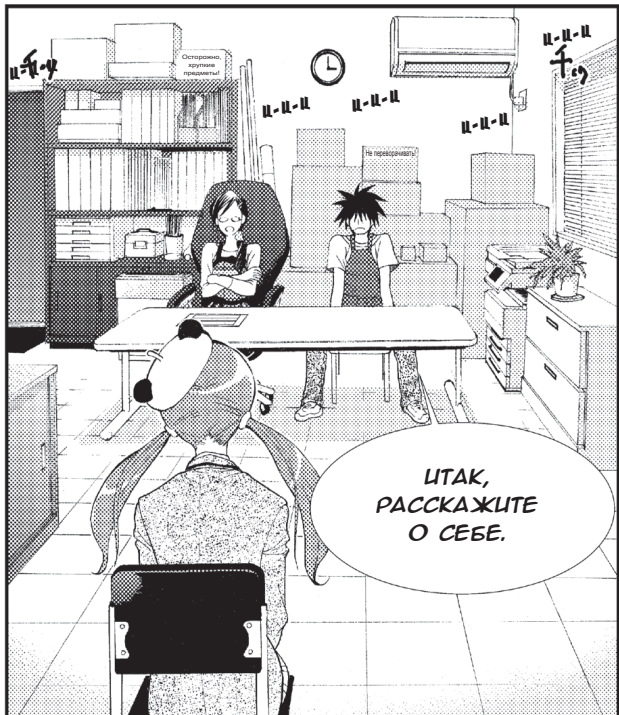
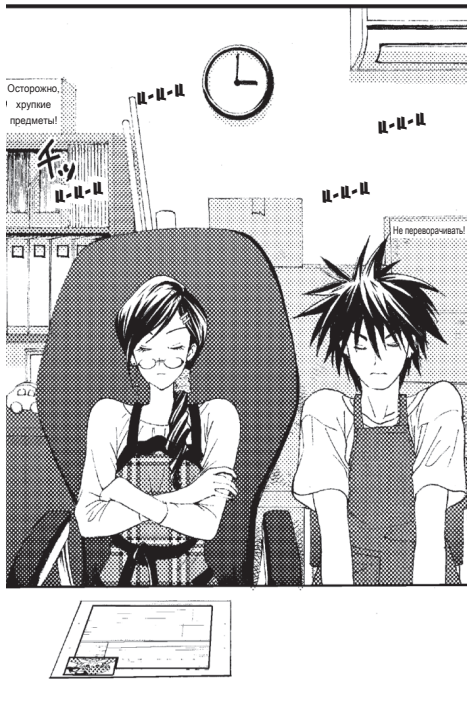
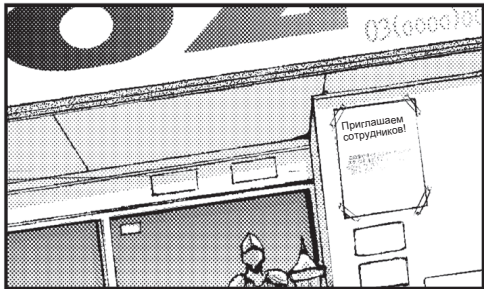
# ГЛАВА 1

## ЧТО ТАКОЕ ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ?





Где-то  
в Токио



ИТАК,  
РАССКАЖИТЕ  
О СЕБЕ.



ХОРОШО!

АИСАКА ЦУМО,  
2 КЛАСС СТАРШЕЙ  
ШКОЛЫ\*  
ПРОШУ ЛЮБИТЬ И  
ЖАЛОВАТЬ!

\* Примерно соответствует 11-му классу в России.



ТАК... АИСАКА...  
ЦУМО-САН...  
ШКОЛЬНИЦА?

ПРО НЕГО  
Я НЕ  
СПРАШИВАЛА...

ОЙ...

А ЭТО-  
ПАМБО\*!



А ТЯЖЁЛУЮ  
ФИЗИЧЕСКУЮ  
РАБОТУ ВЫПОЛНЯТЬ  
СМОЖЕШЬ?

\* Шапка в форме панды.



СМОГУ!  
Я ОЧЕНЬ СИЛЬНАЯ!

БАН!



ВОТ ЭТО ДА...  
ДУМАЛ, КАКНЕ-  
НИБУДА ЖАДНЫЕ  
ТИПЫ ПРИПРУТСЯ,  
А ТУТ — ДЕВУШКА!

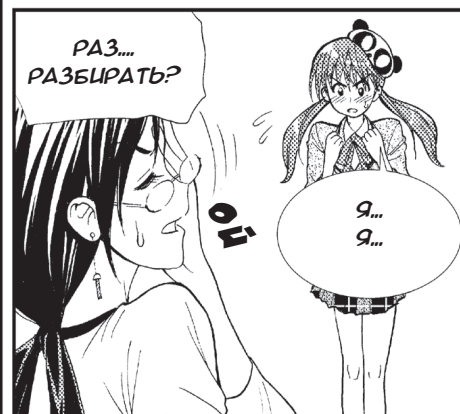
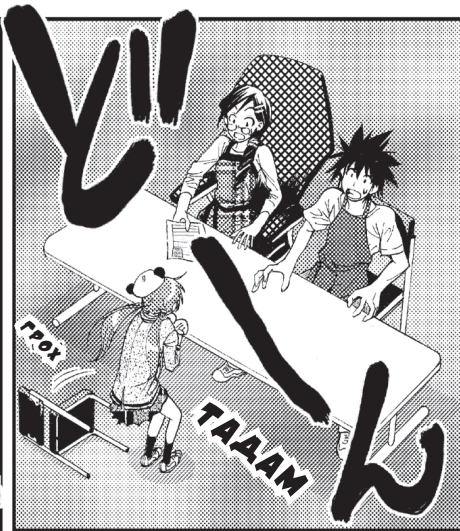
И КРАСАВИЦА,  
К ТОМУ ЖЕ....



ДИРЕКТОР!  
БЕРЁМ!!!

НЕ СУАИ ПО  
ВНЕШНОСТИ!

К ТОМУ ЖЕ  
ЗАЕСЬ  
РЕШАЮ Я!!





...ОБОЖАЮ  
ОТКРУЧИВАТЬ  
ТУГIE ВИНТЫ...

...НЕ СЛИШКОМ  
СТАРЫХ,  
КРАСИВЫХ  
ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ...



...ОТКРЫВАТЬ  
КОРПУС И  
СМОТРЕТЬ, ЧТО  
ВНУТРИ.



У СЕБЯ  
ДОМА  
ПОЧТИ  
ВСЁ  
РАЗОБРАЛА...



ПОДОЖДИ...  
ЗНАЧИТ, ТЫ  
У СЕБЯ ДОМА  
ЧИНИШЬ  
И СОБИРАЕШЬ  
РАЗЛИЧНЫЕ  
ЭЛЕКТРО-  
ПРИБОРЫ?



ЧИНЮ?

СОБИРАЮ?

ДА  
НЕТ ЖЕ!



Я ЛЮБЛЮ  
РАЗОБРАТЬ И  
СМОТРЕТЬ НА  
ТО, ЧТО  
ОСТАЛОСЬ. ♥

ТИПА... ВОТ  
КАКИЕ ОНИ  
ТЕПЕРЬ...

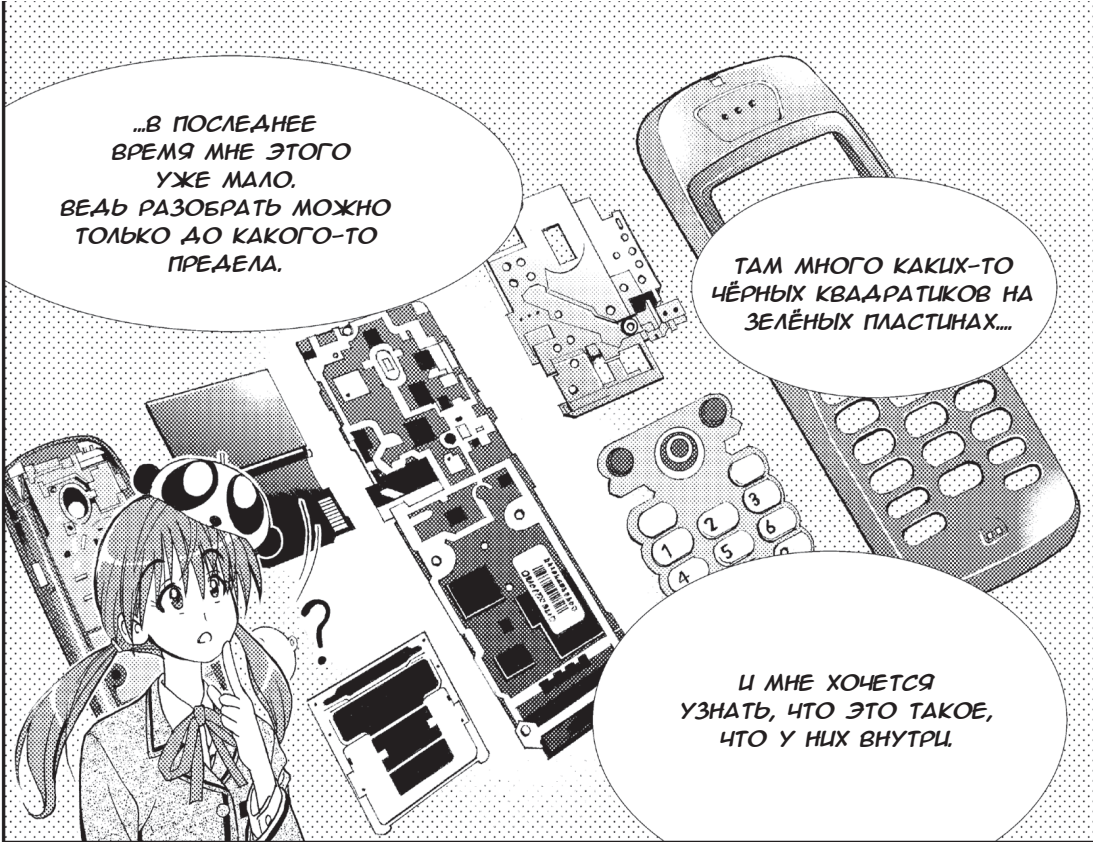
МОЖЕТ, ТУТ  
БОЛЬШЕ  
ПОДХОДИТ  
СЛОВО  
"ЛОМАТЬ"?!



ДИРЕКТОР,  
ЭТА ДЕВУШКА  
ОПАСНА!  
ОТКАЖЕМ ЕЁ!!

КАК БЫСТРО  
ТЫ МЕНЕ  
ИЗМЕНИЛ!





...В ПОСЛЕДНЕЕ  
ВРЕМЯ МНЕ ЭТОГО  
УЖЕ МАЛО.  
ВЕДЬ РАЗОБРАТЬ МОЖНО  
ТОЛЬКО ДО КАКОГО-ТО  
ПРЕДЕЛА.

ТАМ МНОГО КАКИХ-ТО  
ЧЁРНЫХ КВАДРАТИКОВ НА  
ЗЕЛЁНЫХ ПЛАСТИНАХ...

И МНЕ ХОЧЕТСЯ  
УЗНАТЬ, ЧТО ЭТО ТАКОЕ,  
ЧТО У НИХ ВНУТРИ.

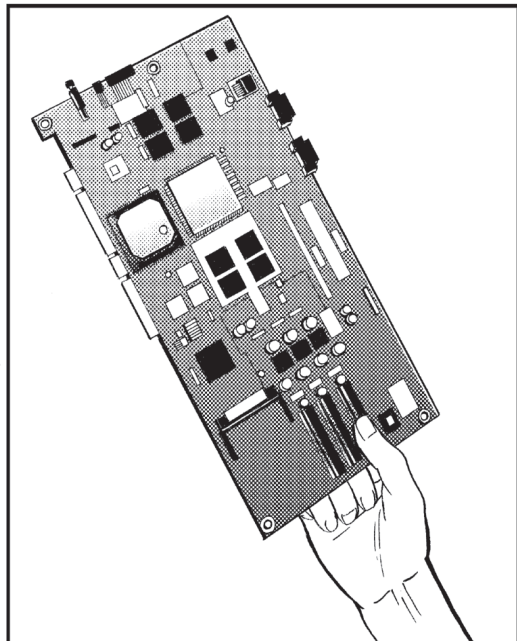
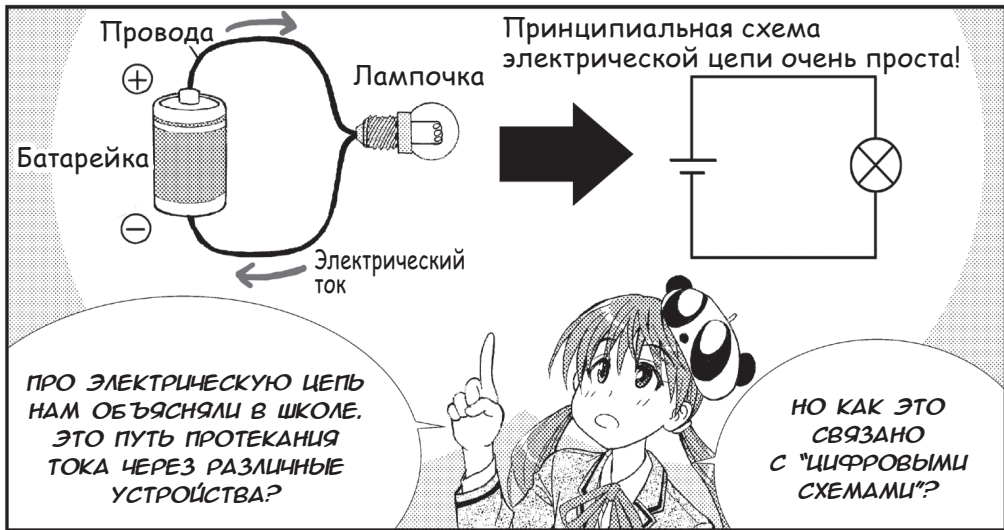
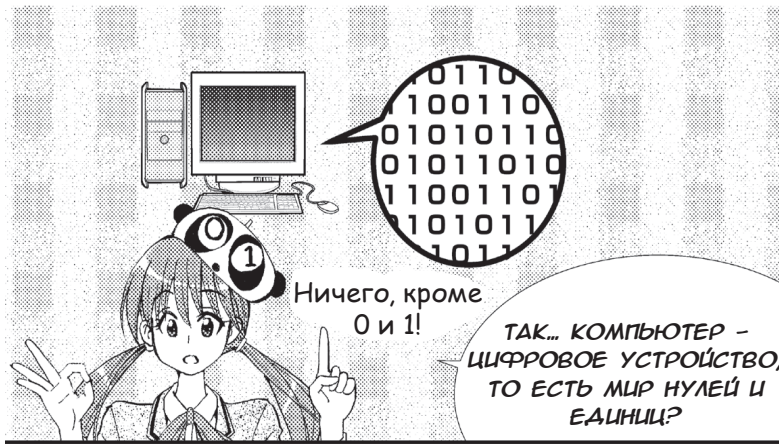
КАКОЕ-ТО  
СТРАННОЕ  
ЧУВСТВО  
ОБУРЕВАЕТ.

ВОТ  
Я РАЗБИРАЮ,  
СМОТРУ, ЧТО  
ВНУТРИ,  
НО ВСЁ РАВНО  
НИЧЕГО  
НЕ ПОНИМАЮ...

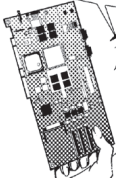
ЧТОБЫ ПОНЯТЬ,  
ЧТО ВНУТРИ  
ЭЛЕКТРОННЫХ  
УСТРОЙСТВ,  
ТЕБЕ НАДО ИЗУЧИТЬ  
ЦИФРОВЫЕ  
СХЕМЫ.

ЦИФРОВЫЕ...  
СХЕМЫ!





ПОГОВОРИМ О КОНКРЕТНЫХ  
ИЗДЕЛИЯХ. ВНУТРИ КОМПЬЮ-  
ТЕРОВ, БЫТОВОЙ ЭЛЕКТРО-  
НИКИ ЕСТЬ "ПЕЧАТНЫЕ  
ПЛАТЫ".



АА, АА.  
ЕСТЬ!

А НА ПЛАТАХ  
УСТАНОВЛЕНЫ РАЗЛИЧНЫЕ  
ЭЛЕКТРОННЫЕ ДЕТАЛИ.



И ОНИ ПОДКЛЮЧЕНЫ  
К ПРОВОДНИКАМ,  
ПО КОТОРЫМ  
ТЕЧЁТ ТОК.

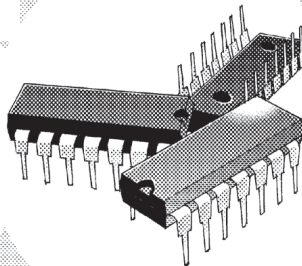
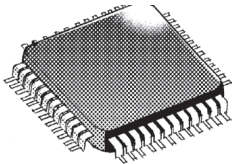
ГМ... АА,  
И ВСЁ ЭТО  
ВЫГЛЯДИТ ТАК  
ЗАПУТАННО.



ВОТ ТАКИЕ  
ДЕТАЛИ,  
КОНЕЧНО ЖЕ,  
ВЩАЕЛА?



ВНУТРИ НОВЕЙШИХ УСТРОЙСТВ  
ОНИ ВОТ ТАКИЕ - ТОНКИЕ И  
МАЛЕНЬКИЕ.



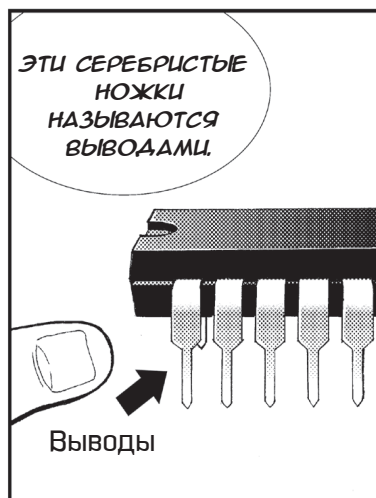
А ВНУТРИ  
УСТАРЕВШИХ - ВОТ ТАКИЕ.

АА, Я ЧАСТО ИХ ВЩАЕЛА И  
УДИВЛЯЛАСЬ!!  
КВАДРАТЫ И  
ПРЯМОУГОЛЬНИКИ, ПОХОЖИЕ  
НА ЧЁРНЫХ ЖУКОВ  
С СЕРЕБРИСТЫМИ  
НОЖКАМИ!!

ЭТО!  
ЭТО!

ЧЁРНЫХ  
ЖУКОВ  
.....?  
.....?



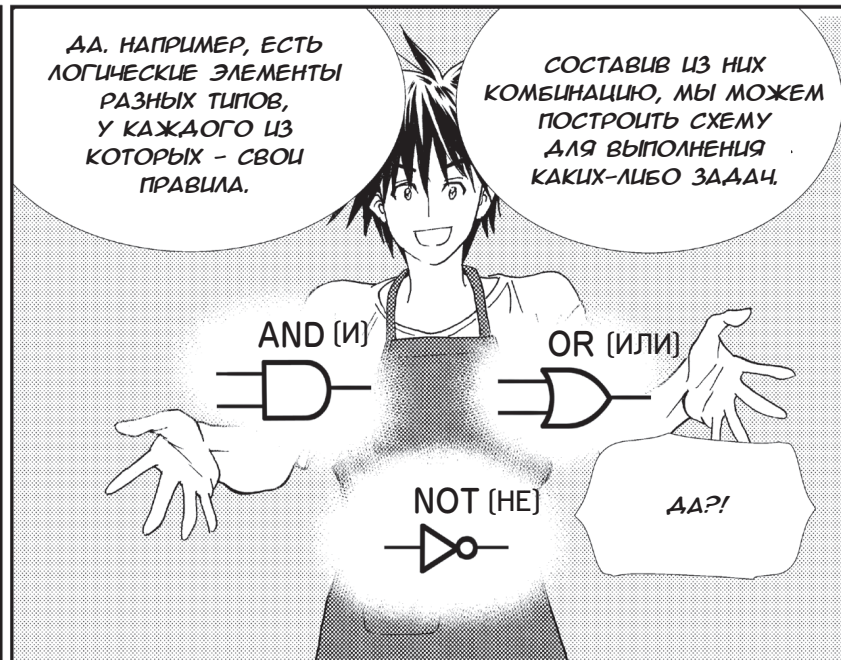


\* Сравнительно большие интегральные схемы иногда называют БИС.





\* Непереводимая игра слов с названием телепередачи и словом «логический». — прим. перев.



СПРОЕКТИРОВАТЬ СХЕМУ -  
ЗНАЧИТ СОЗДАТЬ  
ЭЛЕКТРОННОЕ  
УСТРОЙСТВО,  
РАБОТАЮЩЕЕ ТАК,  
КАК ТЫ ЗАДУМАЛА.



СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРО-  
ПРИБОРОВ, КОТОРЫМИ  
МЫ ПОЛЬЗУЕМСЯ,  
ТОЖЕ НАЧИНАЕТСЯ  
С ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
СХЕМ.

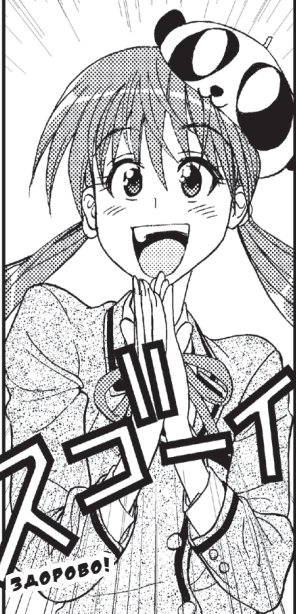
ВСЁ ЭТО  
ИЗУЧАЕТСЯ  
В РАЗДЕЛЕ  
ЭЛЕКТРОНИКИ...

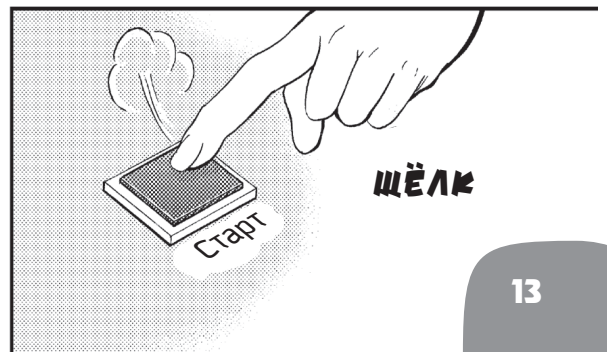
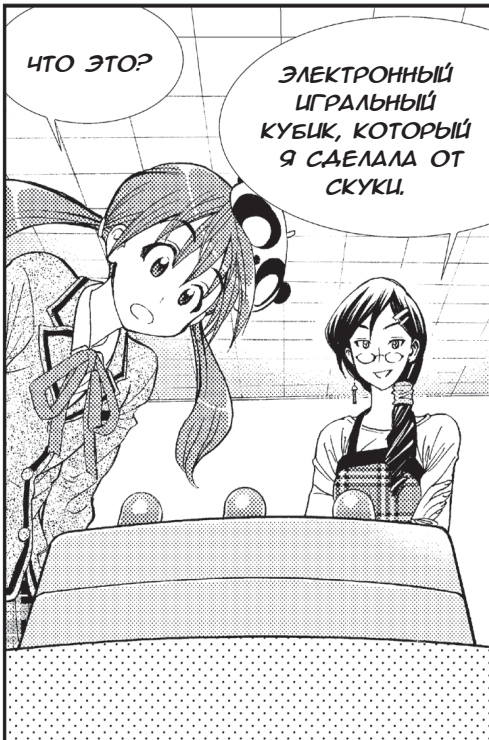
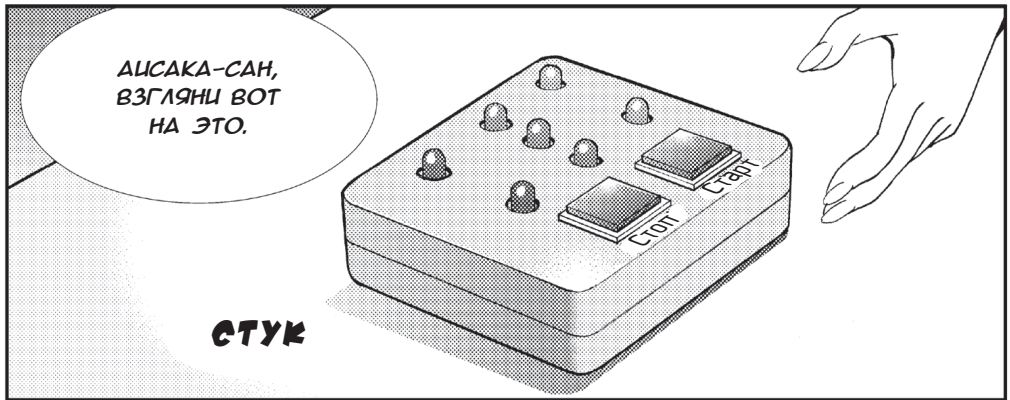


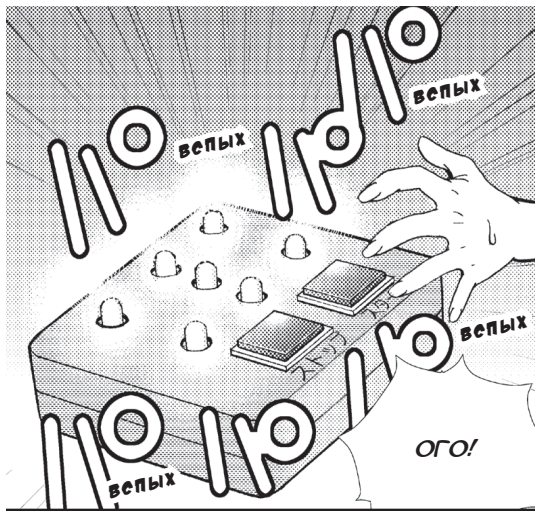
КАК ИНТЕРЕСНО!

НАУКА О  
ЭЛЕКТРОННЫХ  
УСТРОЙСТВАХ,  
КОТОРЫЕ ЕСТЬ  
ПОВСЮДУ!

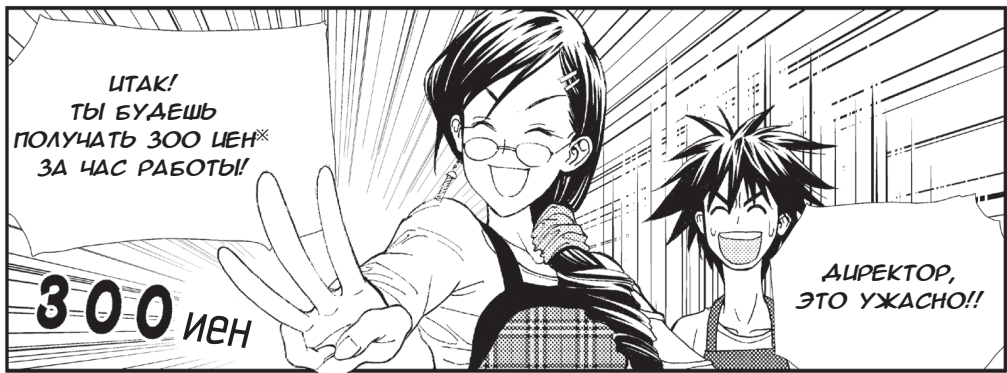
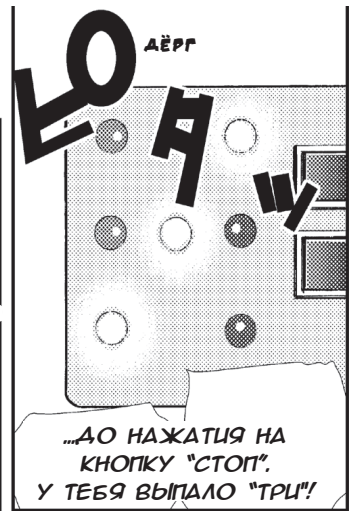
...ПОД НАЗВАНИЕМ  
"ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ!"







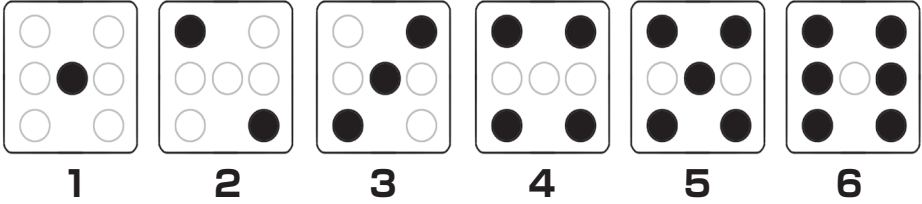
ЛАМПЫ  
БЫСТРО  
ЗАГОРАЮТСЯ  
И ГАСНУТ...



\* Около 150 рублей.

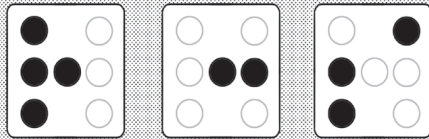


## Допустимые комбинации светодиодов



ВОТ ТАКОГО  
НЕ БУДЕТ  
НИКОГДА.

## Недопустимые комбинации светодиодов



АА,  
НА НАСТОЯЩЕМ  
КУБИКЕ ТАКОГО  
ВЫПАСТЬ  
НЕ МОЖЕТ.

НО ЕСЛИ БЫ  
ВАРУГ ВЫПАЛО,  
ТО Я БЫ  
ИСПУГАЛАСЬ.



ЗНАЕШЬ,  
ПОЧЕМУ  
ЗАГОРАЮТСЯ  
ТОЛЬКО ПРАВИЛЬНЫЕ  
КОМБИНАЦИИ?

ПОТОМУ,  
ЧТО...

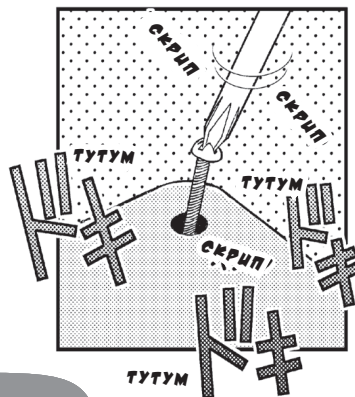


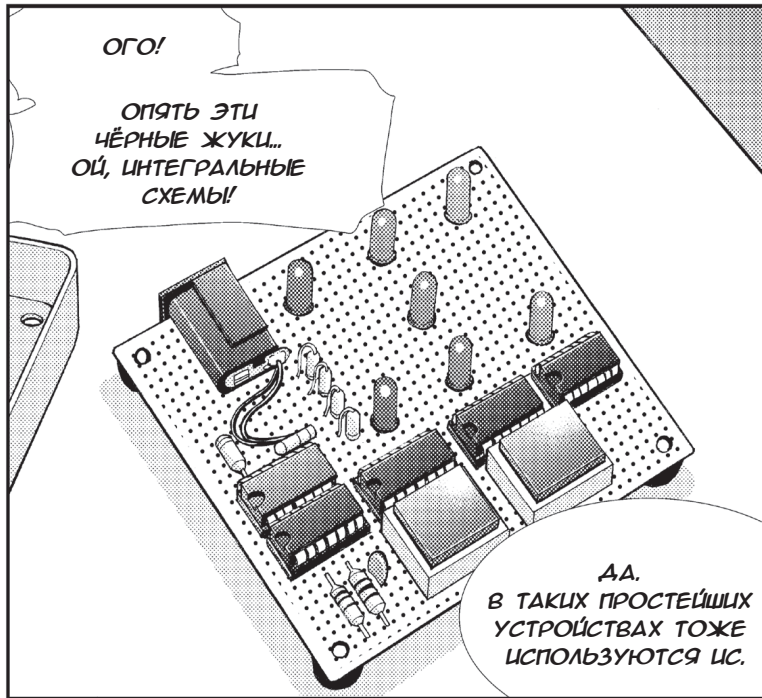
...ТАК  
СПРОЕКТИРОВАНА  
СХЕМА!!!

ВЕРНО!

ГАААА!







ОГО!

ОПЯТЬ ЭТИ  
ЧЁРНЫЕ ЖУКИ...  
ОЙ, ИНТЕГРАЛЬНЫЕ  
СХЕМЫ!

АА.  
В ТАКИХ ПРОСТЕЙШИХ  
УСТРОЙСТВАХ ТОЖЕ  
ИСПОЛЗУЮТСЯ ИС.



ОНИ НУЖНЫ  
ДЛЯ  
РЕАЛИЗАЦИИ  
СХЕМЫ,  
КОТОРУЮ Я  
ПРЕДУМАЛА.

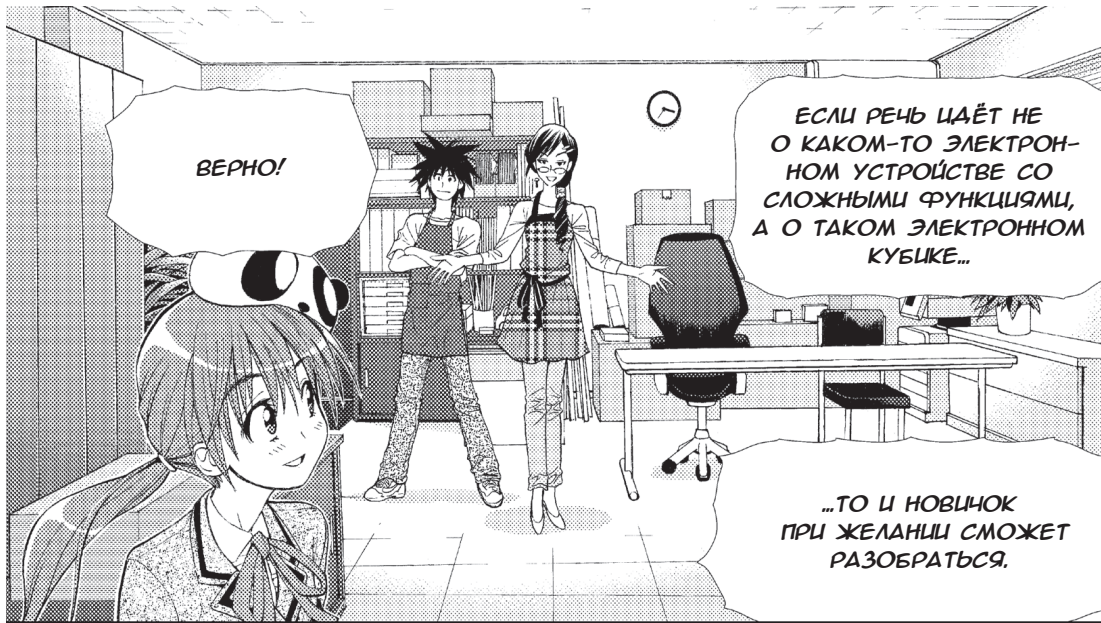


ВОТ КАК?  
ДАЖЕ ТАКАЯ  
ПРОСТАЯ ИГРУШКА  
НЕ ОБХОДИТСЯ  
БЕЗ МИКРОСХЕМ.



МОЖЕТ БЫТЬ,  
ВСЕ ЭТИ ИС, ЦИИ,  
КАК ИХ ТАМ,  
ЛОГИЧЕСКИЕ  
ВЕНТИЛИ...

...НА САМОМ ДЕЛЕ  
ОЧЕНЬ ПРОСТЫ!



ВЕРНО!

ЕСЛИ РЕЧЬ ИДЁТ НЕ  
О КАКОМ-ТО ЭЛЕКТРОН-  
НОМ УСТРОЙСТВЕ СО  
СЛОЖНЫМИ ФУНКЦИЯМИ,  
А О ТАКОМ ЭЛЕКТРОННОМ  
КУБИКЕ...

...ТО И НОВИЧОК  
ПРИ ЖЕЛАНИИ СМОЖЕТ  
РАЗОБРАТЬСЯ.



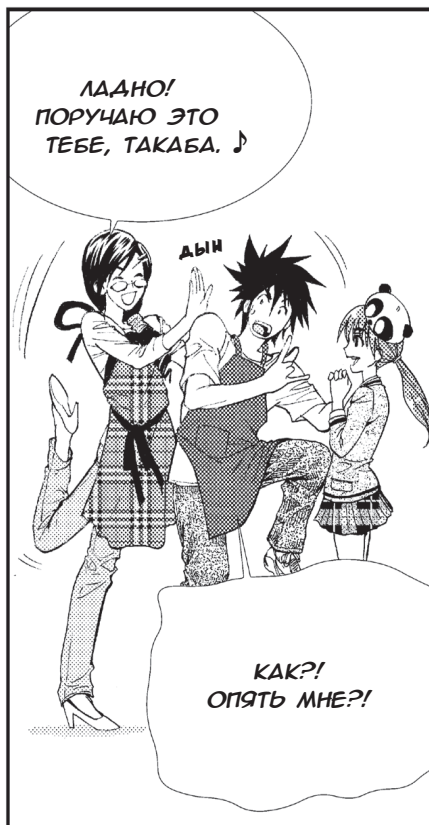
ТЫ ДАЖЕ СМОЖЕШЬ...

...САМА СПРОЕКТИРОВАТЬ  
ЕГО СХЕМУ!!!



ПРАВАА?!  
Я САМА?!

РАССКАЖИ,  
КАК ЭТО СДЕЛАТЬ,  
ПОЖАЛУЙСТА!!!



ЛАДНО!  
ПОРУЧАЮ ЭТО  
ТЕБЕ, ТАКАБА. ♪

АЫН

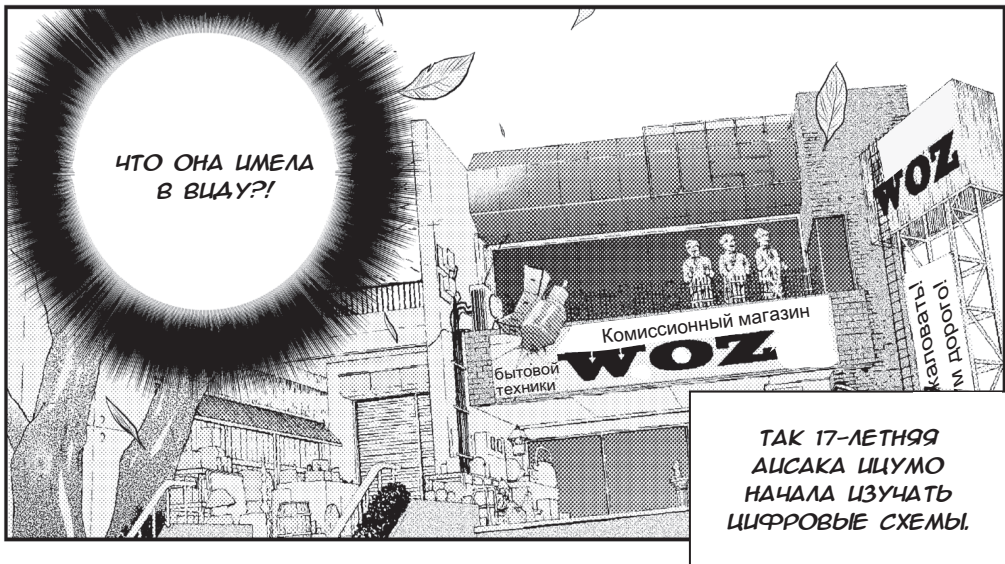
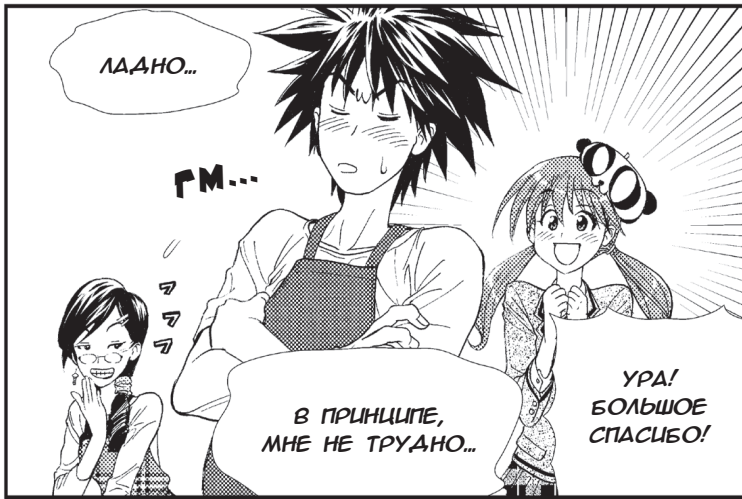
КАК?!  
ОПЯТЬ МНЕ?!



ТАКАБА-САН, НУ  
ПОЖАЛУЙСТА!!

ОБЕЩАЮ  
ПРИЛЕЖНО ИЗУЧАТЬ  
ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ!!!





Интегральные схемы (ИС), называемые ещё микросхемами или чипами, — это полупроводниковые приборы, состоящие из большого числа транзисторов. Многие ИС являются цифровыми устройствами.

Сложность микросхемы определяется степенью интеграции — количеством содержащихся в ней транзисторов. ИС, содержащие более 1 млн транзисторов, иногда называют «большими» (БИС, англ. LSI: Large Scale Circuit). Современные чипы выпускаются в корпусах для поверхностного монтажа с миниатюрными выводами. Поверхностный монтаж (SMD: Surface Mounted Device) — это установка электронной детали на поверхность печатной платы без сквозных отверстий. Разобрав цифровое устройство, например мобильный телефон, вы увидите на его миниатюрной печатной плате подобные микросхемы, но число их будет невелико, ведь высокая степень интеграции современных схем позволяет создавать устройства даже на базе одного-единственного чипа.

В электронном кубике, который разобрала Аисака-сан, использовались ИС низкой степени интеграции в корпусах с двухрядным расположением выводов (DIP: Dual Inline Package), похожие на многоножек. Радиолюбители 70-х, 80-х годов собирали на универсальных платах цифровые устройства из таких микросхем, соединяя их проводами, но в наши дни подобные ИС используются в основном в образовательных целях, а на практике применяются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), логику работы которых задаёт проектировщик. Программируемая пользователем вентильная матрица (ППВМ) — это разновидность ПЛИС, позволяющая легко и с минимальными затратами создавать большие и быстродействующие цифровые схемы. Продаются и специальные тестовые платы, на которые ППВМ устанавливаются без пайки соединений. Однако, хотя в наши дни для создания цифровых схем удобнее использовать ППВМ, такие устройства невозможно «пощупать руками», как это сделала Аисака-сан с электронным кубиком в манге, так как вся электронная схема будет размещаться внутри единственного чипа, поэтому здесь будут рассмотрены устройства на базе обычных микросхем. Так как основные принципы цифровых схем совершенно не зависят от того, используется ли современная ППВМ или же микросхемы низкой степени интеграции, освоив эти принципы, вы сможете создавать любые цифровые схемы с помощью САД (Computer Aided Design: система автоматизированного проектирования, или САПР) и ППВМ.

ППВМ (программируемая пользователем вентильная матрица, англ. FPGA: Field Programmable Gate Array) — это программируемая микросхема, состоящая из большого количества блоков логических элементов, запоминающих элементов (триггеров), соединительных проводников и маленьких переключателей. Устройство классической ППВМ показано на рис. 1.

Заполнив таблицы истинности блоков элементов значениями и правильно установив переключатели, мы сможем создать нужную нам цифровую схему.

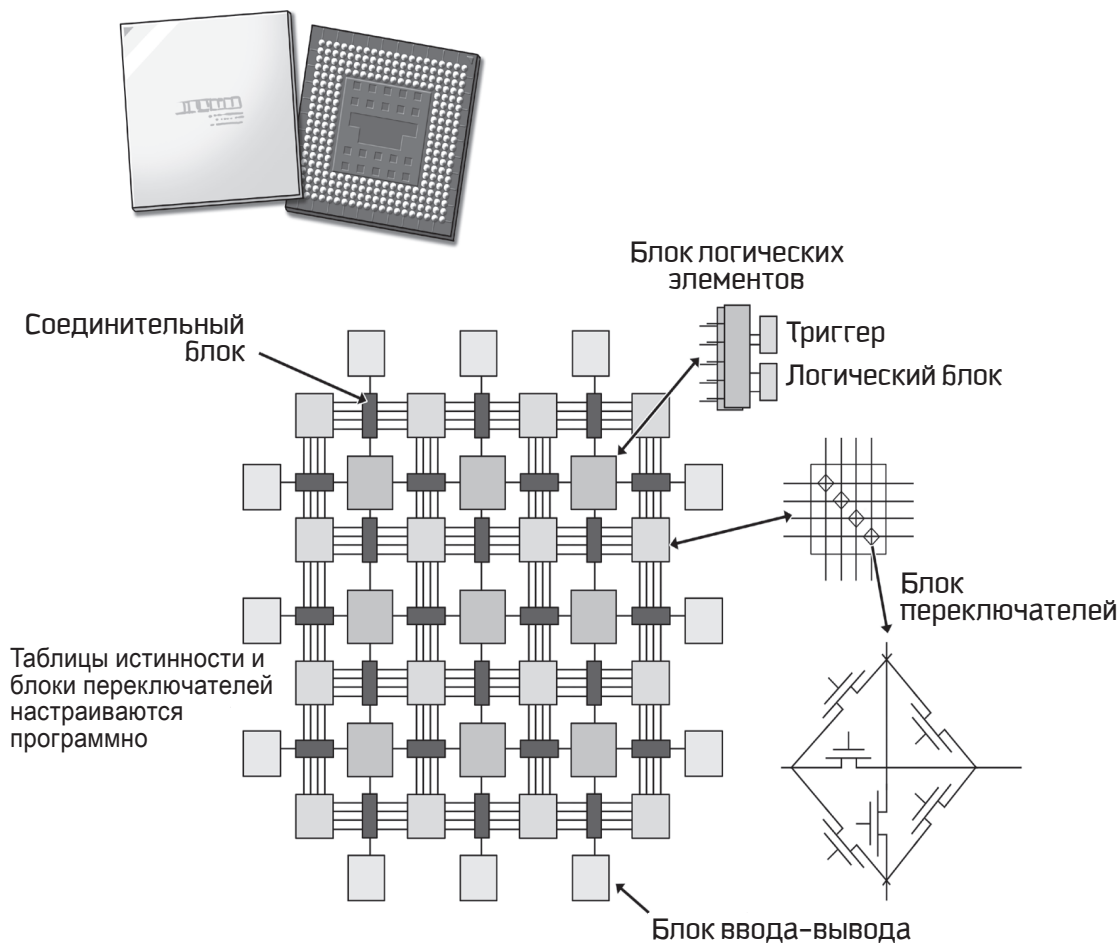
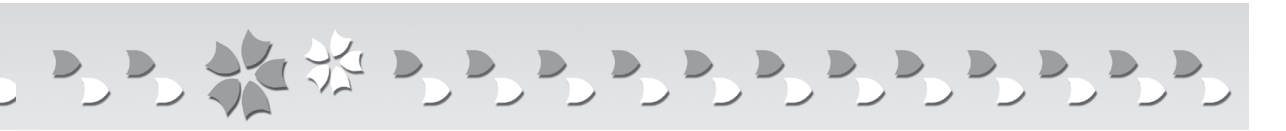


Рис. 1. Устройство ППВМ



Проектирование цифровых схем с помощью ППВМ сводится к написанию компьютерных программ на языках описания аппаратуры (HDL: Hardware Description Language), о которых будет рассказано в разделе «Дополнительная информация» главы 5.

Схема соединений, которая будет записана в ППВМ, создаётся на компьютере средствами САПР. На момент написания этой книги было два знаменитых производителя ППВМ — Xilinx и Altera<sup>※</sup>, и оба они бесплатно предоставляют программное обеспечение САПР в образовательных целях, а недорогую тестовую плату для ППВМ можно приобрести всего за несколько сотен рублей.

Вышеуказанная методика существенно облегчает проектирование и тестирование цифровых схем: микропроцессоров, систем управления роботами или игрушками и т. п. Проводятся даже конкурсы самодельных устройств на базе ППВМ, например электронных игрушек.

<sup>※</sup> В настоящее время компания Altera поглощена корпорацией Intel, однако поддержка старых устройств ещё сохраняется. — *прим. ред.*

◆ Altera

<https://www.altera.com/products.html>

[http://www.alterawiki.com/wiki/Main\\_Page](http://www.alterawiki.com/wiki/Main_Page)

◆ Xilinx

<https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html>



## Объяснение терминов главы 1

- **ИС (интегральная схема, микросхема, чип)** — полупроводниковый прибор, в котором интегрировано множество транзисторов. ИС могут быть цифровыми или аналоговыми, но в книге мы будем изучать только цифровые микросхемы, используемые в цифровых устройствах. ИС высокой степени интеграции называют также БИС (большими интегральными схемами).
- **Логические схемы** — схемы, выполняющие логические операции, например AND (И), OR (ИЛИ), NOT (НЕ) и т. п. над значениями 1 и 0. Можно считать синонимом термина «цифровые схемы».
- **Логический вентиль** — базовый элемент, выполняющий логические операции: AND (И, конъюнкция, логическое умножение), OR (ИЛИ, дизъюнкция, логическое сложение), NOT (НЕ, отрицание, инверсия), NAND (И-НЕ, штрих Шеффера) и XOR (исключающее ИЛИ, логическое вычитание). В главе 2 описывается устаревший чип стандартной логики SN7432<sup>※1</sup> из нескольких логических вентилях, довольно распространённый в прошлом.
- **Алгебра логики (булева логика<sup>※2</sup>, двоичная логика)** — математические правила, лежащие в основе проектирования цифровых схем. Подробнее см. раздел «Дополнительная информация» главы 2.

※1 Отечественный аналог — микросхема К155ЛЛ1. — прим.перев.

※2 Не путать с «булевой алгеброй». — прим.перев.