

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

МАНГА

ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

Танака Кэнъити
Такаяма Яма

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ
МАНГА



Танака Кэнъити
Такаяма Яма
Trend-Pro Co., Ltd.

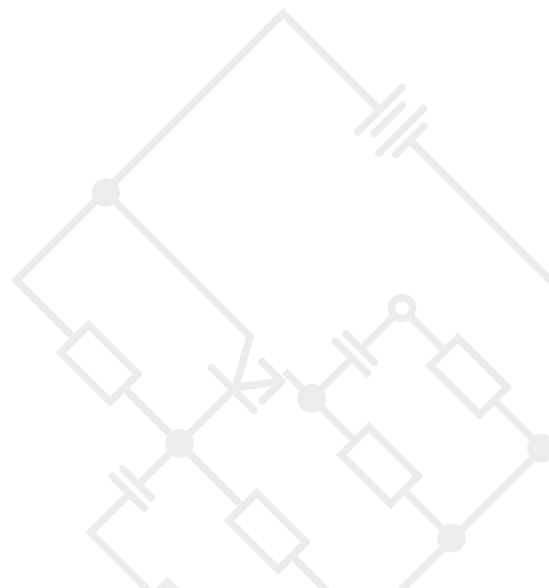
OHM
Ohmsha

DMK
ИЗДАТЕЛЬСТВО



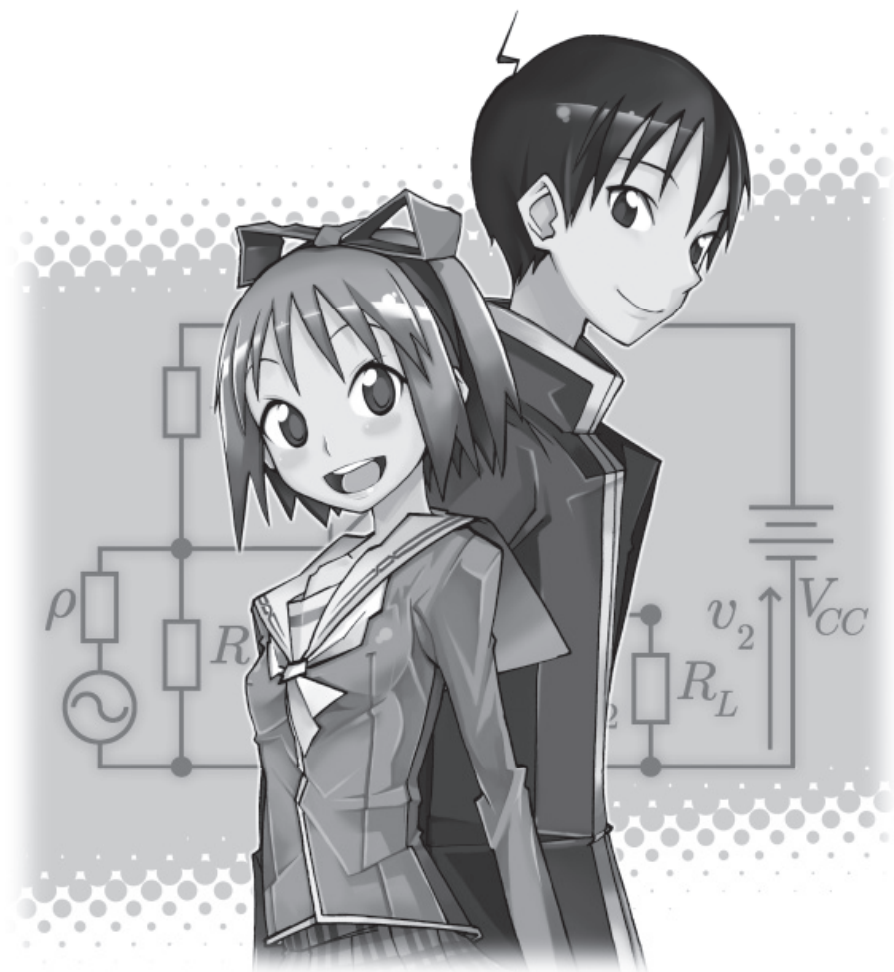
Электронные схемы

Манга



マンガでわかる 電子回路

田中 賢一／著
高山 ヤマ／作画
トレンド・プロ／制作



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

Танака Кэнъити

Такаяма Яма

Перевод с японского
Клионский А. Б.



ДМК
пресс
издательство

Москва
ДМК Пресс, 2016

УДК 621.38.01

ББК 32.85

K35

Танака Кэнъити

K35 Занимательная электроника. Электронные схемы / Танака Кэнъити (автор), Такаяма Яма (худож.) ; пер. с яп. Клионского А. Б. — М. : ДМК Пресс, 2016. — 184 с. : ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп.

ISBN 978-5-97060-353-6.

Электронные схемы основаны на обычных электрических цепях, однако, в отличие от последних, содержат полупроводниковые элементы, такие как диоды, транзисторы, а по мере усложнения превращаются в интегральные схемы. Именно электронные схемы лежат в основе электронных приборов, окружающих нас в быту.

Чтобы объяснить принципы работы электронных схем «с нуля», в этой книге используется транзисторный радиоприёмник – в доступной форме описываются процессы преобразования принимаемых антенной радиоволн, заканчивающиеся воспроизведением звука. Обычно многие учебники по радиоэлектронике начинаются с описания простейшего усилителя, а затем постепенно переходят к более сложным схемам. Однако в этой книге автор решил взять за основу путь прохождения сигнала, то есть описать процесс, начинающийся с выбора нужного канала из принимаемых антенной радиоволн и заканчивающийся воспроизведением звука. Чтобы процесс обучения был ещё увлекательнее, в Манге вам составят компанию два персонажа – ученики старшей школы Сидэн Тору и Эрэки Ая.

Простота изложения и увлекательный сюжет о любви старшеклассников поможет начинающим любителям электроники получить базовые знания по теории электронных схем.

УДК 621.38.01

ББК 32.85

Original Japanese edition

Manga de Wakaru Denshi Kairo (Manga Guide: Electronic Circuits)

By Kenichi Tanaka (Author), Yama Takayama (Illustrator) and

Trend-Pro Co., Ltd. (Producer)

Published by Ohmsha, Ltd.

3-1 Kanda Nishikicho, Chiyodaku, Tokyo, Japan

Russian language edition copyright © 2016 by DMK Press

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

ISBN 978-4-274-06777-8 (яп.) Copyright © 2009 by Kenichi Tanaka and Trend-Pro Co., Ltd

ISBN 978-5-97060-353-6 (рус.) © Перевод, оформление, издание, ДМК Пресс, 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электронные схемы основаны на обычных электрических цепях, однако, в отличие от последних, содержат полупроводниковые элементы, такие как диоды, транзисторы, а по мере усложнения превращаются в интегральные схемы. Именно электронные схемы лежат в основе электронных приборов, окружающих нас в быту.

Чтобы объяснить принципы работы электронных схем «с нуля», в этой книге используется транзисторный радиоприёмник – в доступной форме описываются процессы преобразования принимаемых антенной радиоволн, заканчивающиеся воспроизведением звука. Обычно многие учебники по радиоэлектронике начинаются с описания простейшего усилителя, а затем постепенно переходят к более сложным схемам. Однако в этой книге я решил взять за основу путь прохождения сигнала, то есть описать процесс, начинающийся с выбора нужного канала из принимаемых антенной радиоволн и заканчивающийся воспроизведением звука. Мне кажется более естественным осваивать электронные схемы в процессе изучения системы под названием «радиоприёмник», двигаясь вдоль пути прохождения сигнала от радиоволны к звуку. Чтобы процесс обучения был ещё увлекательнее, в манге вам составят компанию два персонажа – ученики старшей школы Сидэн Тору и Эрэки Ая.

Опираясь на лекции по теории электронных схем, которые я читаю в университете, я постарался сделать содержание книги интересным как для учащихся профессиональных школ, так и для всех, кого заинтересовала электроника.

В заключение я хочу поблагодарить художника манги г-на Такаюма Яма, коллектив компании TREND-PRO, отвечавший за оформление, а также всех сотрудников издательства Ohmsha, которое дало мне возможность взяться за перо. Кроме того, я признателен читателям, изволившим открыть эту книгу, и буду очень рад, если она поможет Вам пробудить интерес к электронным схемам.

*Танака Кэнъити.
Октябрь, 2009 г.*

СОДЕРЖАНИЕ

Пролог. БЕСТОКОЙНЫЙ НОВИЧОК	1
---	---

Глава 1. ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ? А ЧТО ЭТО ТАКОЕ? ...	9
--	---

1.1. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА	11
--	----

1.2. РАЗЛИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ.....	13
---------------------------------------	----

Усилители	13
-----------------	----

Генераторы	14
------------------	----

Модуляторы	15
------------------	----

Демодуляторы.....	16
-------------------	----

Фильтры	16
---------------	----

Операционные усилители	18
------------------------------	----

Логические схемы	19
------------------------	----

Источники питания	21
-------------------------	----

1.3. ПРОСТЕЙШИЙ ПРИМЕР РАДИОПРИЁМНИКА	23
---	----

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	27
--------------------------------	----

Операционный усилитель - совершенная схема усиления	27
---	----

Логические схемы	28
------------------------	----

Глава 2. УСТРОЙСТВО ТРАНЗИСТОРА	31
---	----

2.1. ЧТО ТАКОЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ?	34
--------------------------------------	----

Ковалентные связи между атомами кремния	36
---	----

Полупроводники <i>p</i> -типа	38
-------------------------------------	----

Полупроводники <i>n</i> -типа	39
-------------------------------------	----

2.2. ДИОДЫ С <i>p-n</i> -ПЕРЕХОДОМ.....	40
---	----

Напряжение смещения.....	41
--------------------------	----

Выпрямитель	43
-------------------	----

2.3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	44
Транзисторы $p-n-p$ -типа	46
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	54
Устройство и принцип работы ПТУП (J-FET)	54
ПТ МОП (MOS-FET)	55
Отличия между биполярными и полевыми транзисторами	56

Глава 3.

СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ..... 57

3.1. ПРАВИЛА КИРХГОФА	62
Анализ цепей	62
Первое и второе правила Кирхгофа	63
3.2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ RLC -ЦЕПИ	65
3.3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА С h -ПАРАМЕТРАМИ	67
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	75
Источники напряжения и источники тока	75
Что такое коэффициент передачи по напряжению	75
Коэффициент передачи тока	76
Использование обозначений i и j в комплексных числах	76

Глава 4.

РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ 77

4.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ	81
Что такое амплитудно-модулированная волна	83
Форма амплитудно-модулированной волны	84
4.2. ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ	88
Закорачивание элементов	90
Эквивалентная схема для высоких частот	91
Паразитная ёмкость и эффект Миллера	92
Упрощение эквивалентной схемы для высоких частот	95
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	101
Частотная характеристика коэффициента передачи тока для резонансного усилителя	101

Эквивалентная схема транзистора для высоких частот.....	103
Пересчёт импедансов.....	106

Глава 5.

ДЕМОДУЛЯТОР107

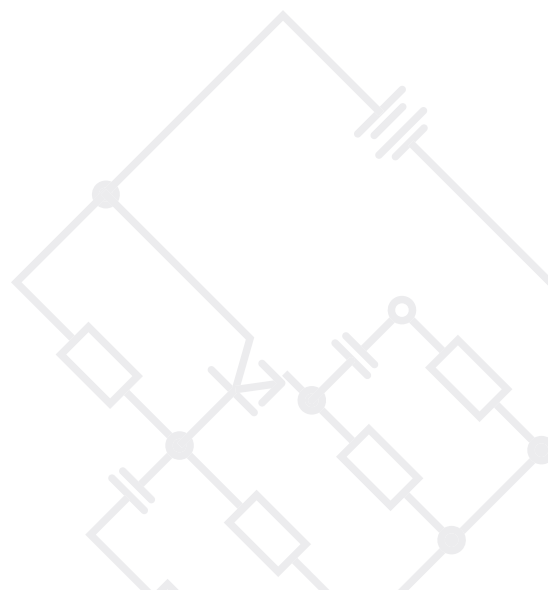
5.1. ДЕМОДУЛЯЦИЯ И ЛИНЕЙНЫЙ ДЕТЕКТОР.....	110
Демодуляция.....	111
Линейный детектор.....	111
Принцип линейного детектирования.....	112
5.2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ.....	114
5.3. ФИЛЬТРЫ.....	115
Фильтры нижних частот.....	115
Фильтры верхних частот.....	116
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	122
О частотной модуляции (ЧМ).....	122

Глава 6.

УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ125

6.1. ЧТО ТАКОЕ УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ.....	130
Три типа усилителей.....	131
6.2. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ.....	132
6.2.1. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА.....	133
6.2.2. ЦЕПЬ СМЕЩЕНИЯ.....	134
Что такое рабочие точки.....	136
Оптимальная рабочая точка.....	137
6.2.3. СХЕМА УСИЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	138
Эквивалентная схема для переменного тока.....	139
6.2.4. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ПО ТОКУ.....	141
Коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером.....	143
Инверсия фазы.....	144
6.2.5. ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНСЫ (1).....	145
Входной импеданс $Z_{вх}$ (1).....	145
Выходной импеданс $Z_{вых}$ (1).....	146

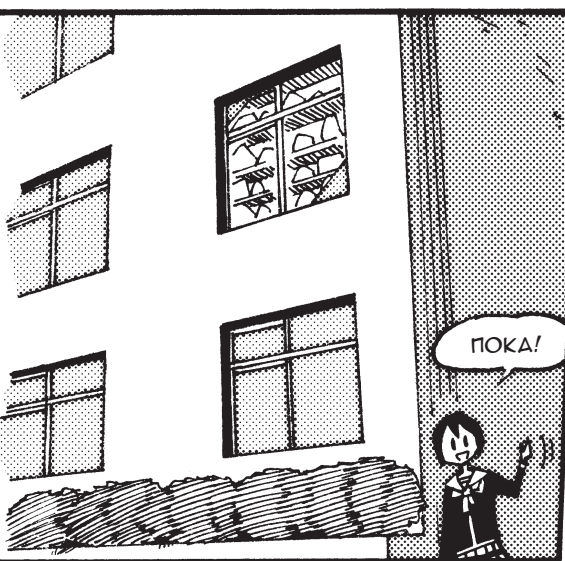
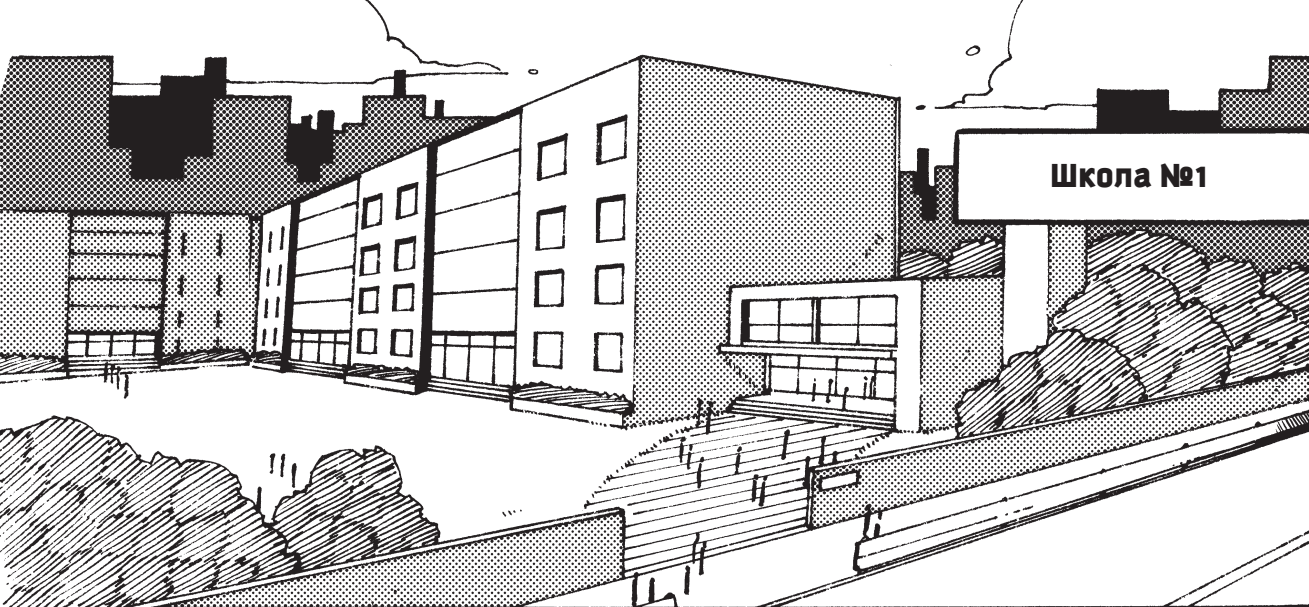
6.3. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ	148
6.3.1. ЭМИТТЕРНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ	148
Буферный каскад	148
6.3.2. РАСЧЁТ ЦЕПТИ СМЕЩЕНИЯ	150
6.3.3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	151
6.3.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ УСИЛЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ТОКУ	155
Коэффициент усиления по напряжению	155
Коэффициент усиления по току	156
6.3.5. ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНСЫ (2)	157
Входной импеданс $Z_{вх}$ (2)	157
Выходной импеданс $Z_{вых}$ (2)	158
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	160
Связь с децибелами (дБ)	160
Зачем нужен эмиттерный повторитель?	160
Что произойдёт при каскадном включении эмиттерного повторителя?	161
Каскадирование усилителей	162
Характеристики усилителя на высоких частотах	164
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	172

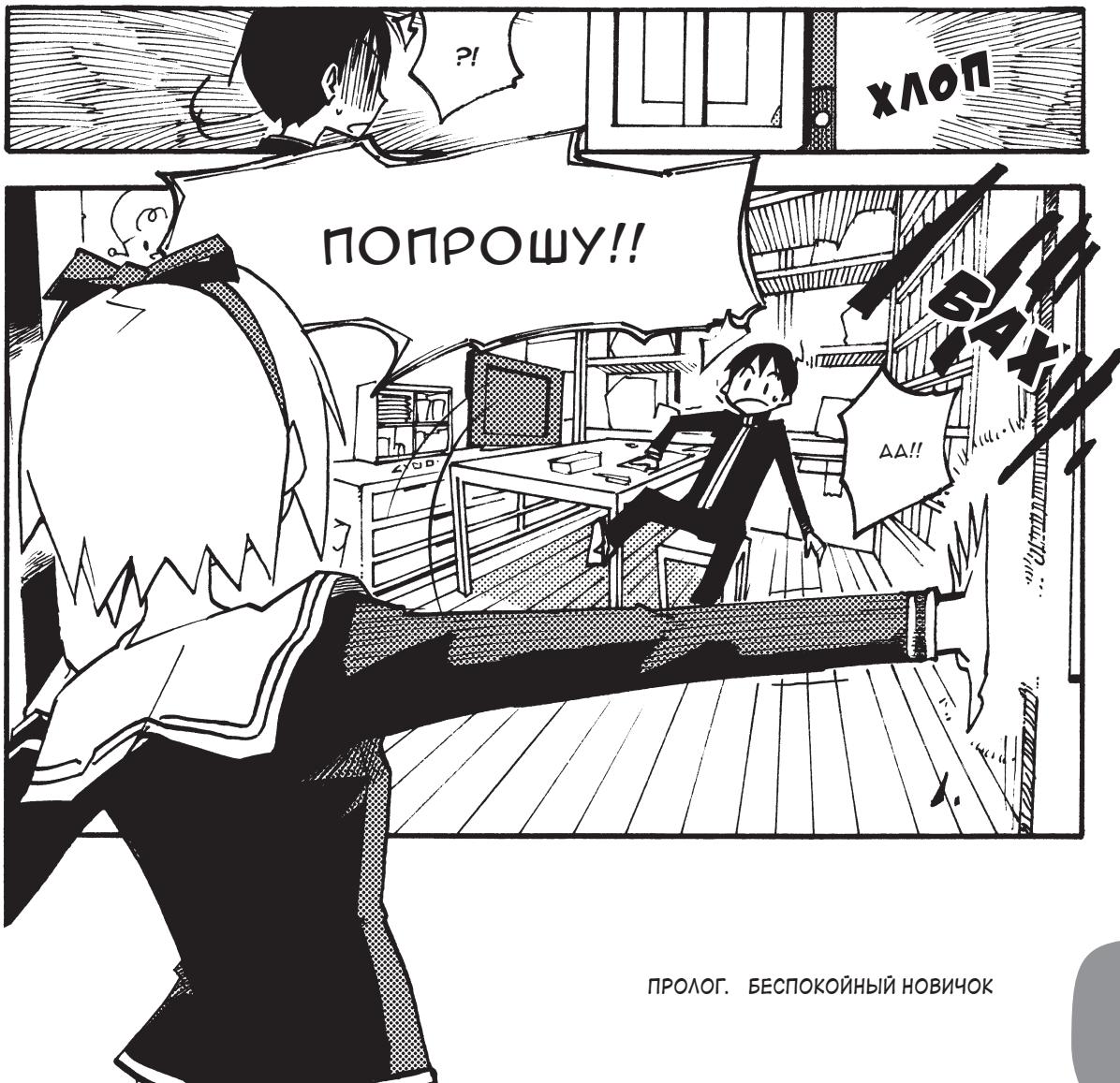


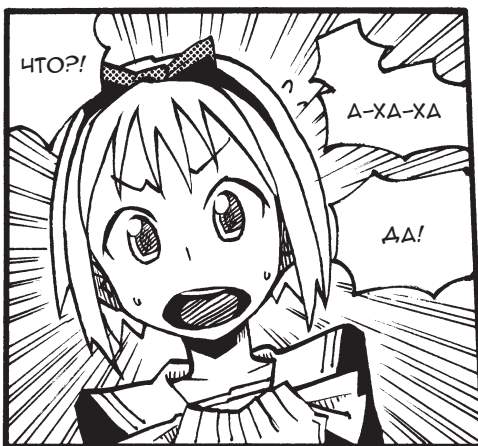
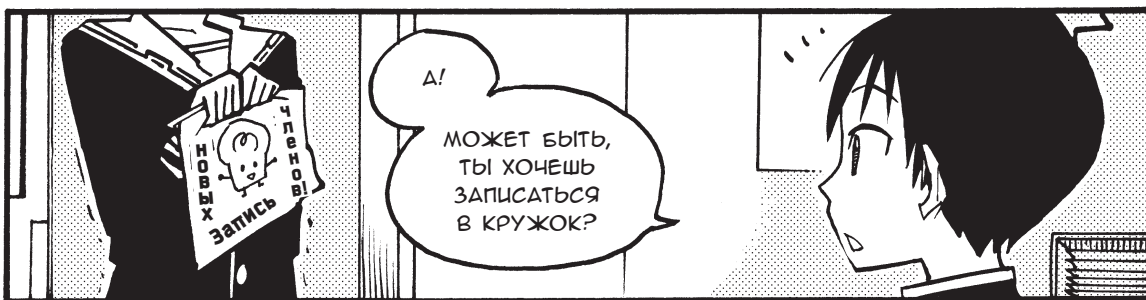
ПРОЛОГ.

БЕСПОКО́ЙНЫЙ НОВИ́ЧОК











ДА,
ДА,
ДА!

я....

КОНЕЧНО.
КОНЕЧНО.
ЛЮБЛЮ!!



ЧТО?

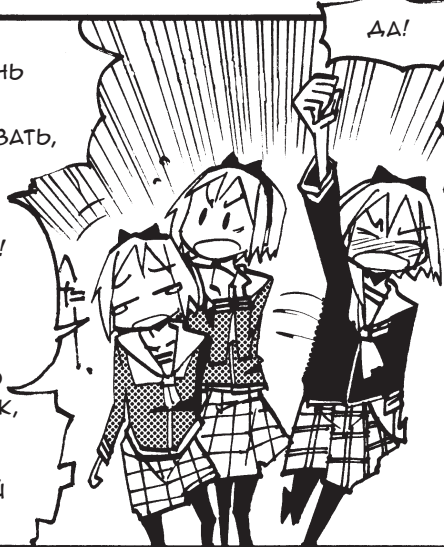
А,
НЕТ, НЕТ,
Я ЭТО
ЛЮБЛЮ!

СКАЗАТЬ, ЧТО Я ЛЮБЛЮ
ЭЛЕКТРОНИКУ? ДА! Я ОЧЕНЬ
ЛЮБЛЮ ЭЛЕКТРОНИКУ!

ОДНАКО, КАК БЫ ЭТО СКАЗАТЬ,
Я В НЕЁ НЕ ОЧЕНЬ-ТО
И РАЗБИРАЮСЬ...
ИЛИ ЛУЧШЕ СКАЗАТЬ,
ВООБЩЕ НЕ ПОНИМАЮ!
НИ КАПЕЛЬКИ!

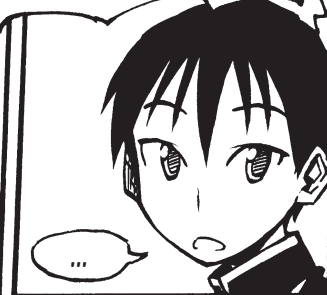
ОДНАКО ИНТЕРЕС
ВСЁ ЖЕ ЕСТЬ.
ВОТ Я И ПОДУМАЛА, ЧТО
ЕСЛИ ЗАПИШУСЬ В КРУЖОК,
ТО СМОГУ НАУЧИТЬСЯ...

КАК НЕСКРОМНО С МОЕЙ
СТОРОНЫ!!

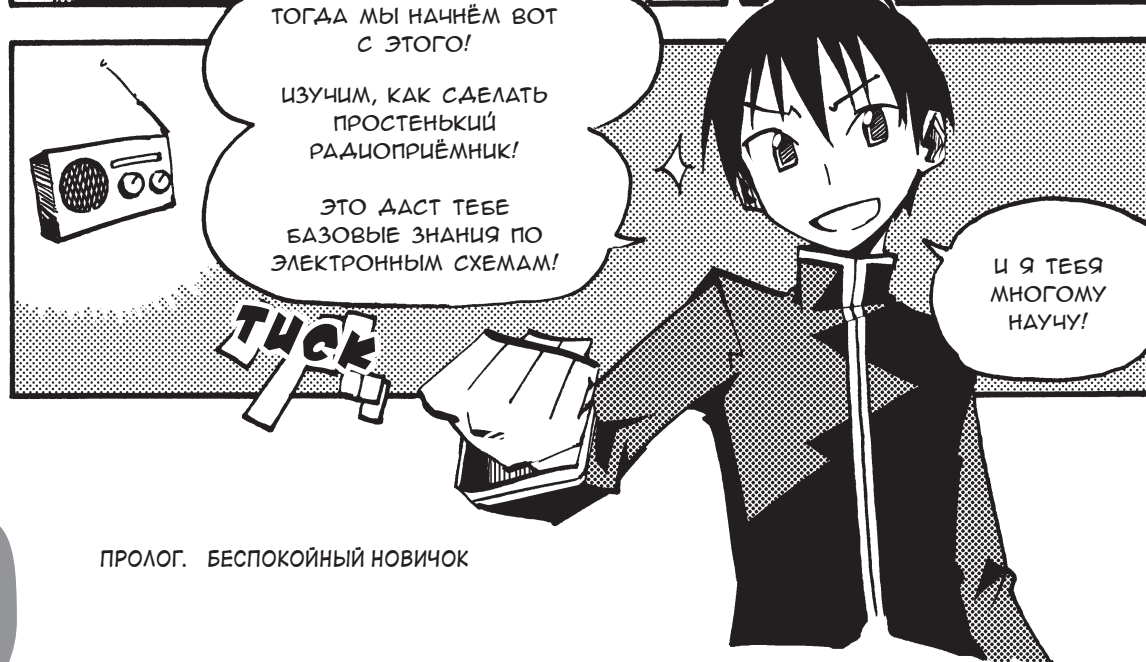
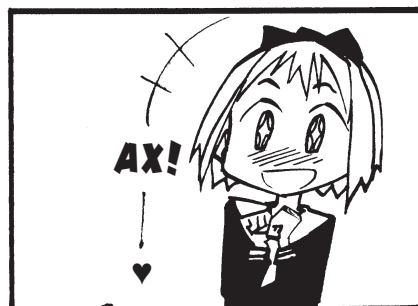


ДА!

Я ГЛУПАЯ, ДУРОЧКА
И ПРОСТОФЛЯ,
К ТОМУ ЖЕ НЕУМЁХА.
В ОБЩЕМ, СОВСЕМ ОБЫЧНАЯ
СТАРШЕКЛАССНИЦА,
МОЖНО ТАК СКАЗАТЬ?
ОДНАКО Я ХОЧУ С ТОБОЙ
ПОДРУЖИТЬСЯ! ТЫ НЕ
ПРОТИВ??



...





ТЫ ПРАВДА
НЕ ВОЗРАЖАЕШЬ?

НЕТ,
КОНЕЧНО



СТЫДНО ПРИЗНАТЬСЯ,
НО СЕЙЧАС В ЭТОМ
КРУЖКЕ ТОЛЬКО Я
СЕРЬЁЗНО ЗАНИМАЮСЬ.
СКУЧНО ВСЁ ВРЕМЯ
ОДНОМУ...

ДА, ЗОВУТ МЕНЯ
СИДЭН ТОРУ.

ДОБРО
ПОЖАЛОВАТЬ!



ТО ЕСТЬ МОЖНО
ЗАПИСАТЬСЯ?!!
ТЫ ВСЁ ВРЕМЯ
ОДИН?!!
ЗНАЧИТ, ЕСЛИ Я
ЗАПИШУСЬ...



...МЫ С ТОБОЙ БУДЕМ ОДИН?!!

ЧТО?!!

БАХ

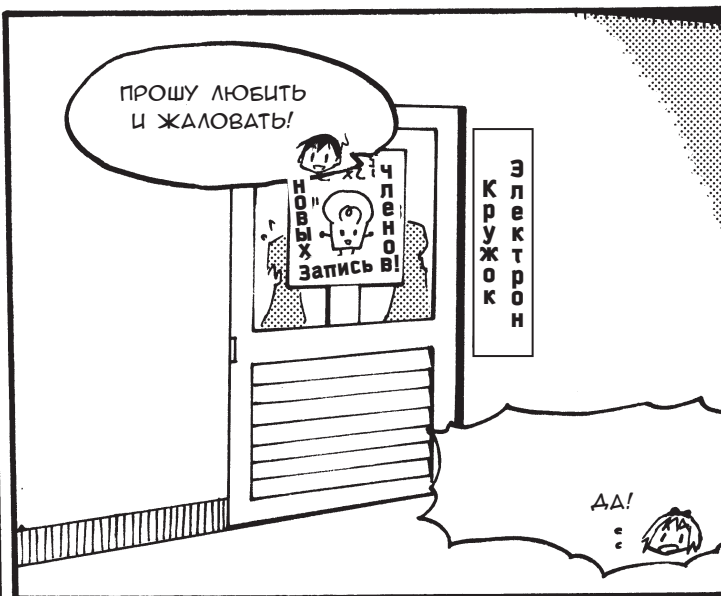
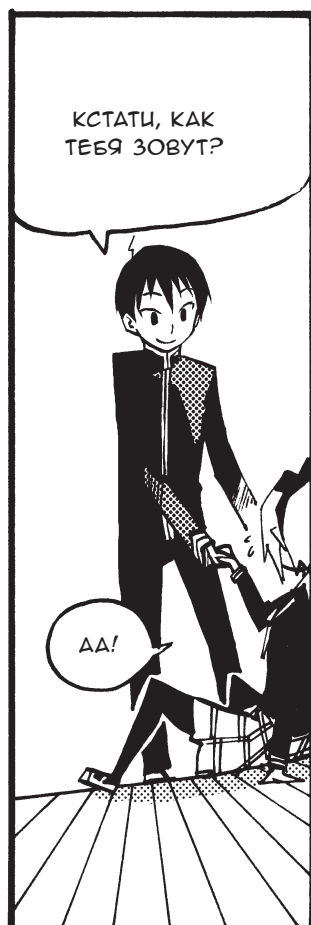


Э...

С ТОБОЙ...
ВСЁ В
ПОРЯДКЕ?

А...АА, В ПОРЯДКЕ.

ГМ...
СТРАННАЯ КАКАЯ-ТО...



1 ГЛАВА

ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ? А ЧТО ЭТО ТАКОЕ?





НУ...
ТЫ ВРОДЕ
УСПОКОИЛАСЬ?

БУЛЬ



ПРОСТИ!
ВСЁ УЖЕ
В ПОРЯДКЕ!

ЛУЧШЕ...
РАССКАЖИ МНЕ
ПРО ЭЛЕКТРОННЫЕ
СХЕМЫ!

ПРЯМО
СЕЙЧАС?

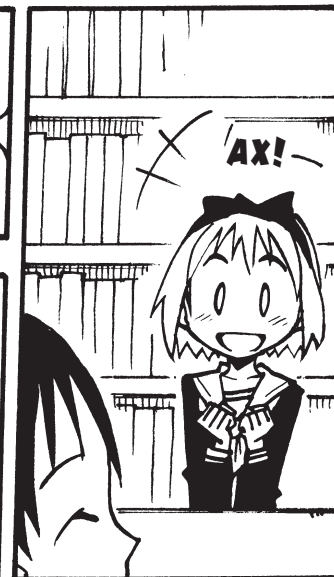
ВОТ ЭТО
ЭНТУЗИАЗМ!



НЕТ... Я ПРОСТО...
ХОЧУ ПОСЛУШАТЬ
ТВОЙ РАССКАЗ...
ТЕБЕ НЕ ТРУДНО?

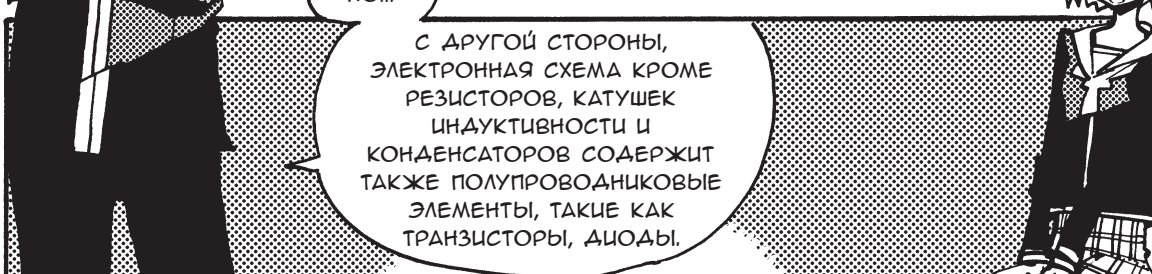


АА ЧТО ТЫ!
С УДОВОЛЬСТВИЕМ
РАССКАЖУ!



Ах!

1.1. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА



ИХ ОТЛИЧИЯ МОЖНО
ПРЕДСТАВИТЬ В
ВИДЕ ВОТ ТАКОЙ
ТАБЛИЦЫ!

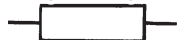
Отличия элементов, содержащихся в электрических цепях
и электронных схемах

Элементы	Единицы измерения	Электрические цепи	Электронные схемы
Сопротивление (R)	ом [Ом]	○	○
Индуктивность (L)	генри [Гн]	○	○
Ёмкость (C)	фарад [Ф]	○	○
Диод	Не определены однозначно	×	○
Транзистор	Не определены однозначно	×	○
Другие полупроводниковые элементы	Не определены однозначно	×	○

ДАЛЕЕ НА ЧЕРТЕЖАХ
ЭЛЕМЕНТЫ
ИЗОБРАЖАЮТСЯ
ВОТ ТАК

ЗНАЧИТ, ЦЕПИ
ОТЛИЧАЮТСЯ
ТОЛЬКО
СОСТАВНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ?

(а) Сопротивление
(резистор)



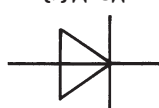
(б) Индуктивность
(катушка)



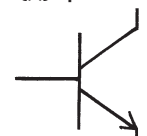
(в) Ёмкость
(конденсатор)



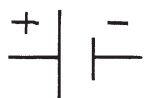
(г) Диод



(д) Транзистор



(е) Источник напряжения
постоянного тока



(ж) Источник напряжения
переменного тока



(з) Источник тока



НУ ТЕПЕРЬ, КОГДА МЫ РАЗОБРАЛИСЬ
В ОТЛИЧИЯХ, ДАВАЙ ПОГОВОРИМ ПРО
ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ БЫВАЮТ САМЫЕ
РАЗНЫЕ, НО ИХ ГРУБО МОЖНО
РАЗДЕЛИТЬ НА ВОСЕМЬ ТИПОВ. Я ОПИШУ
ОСОБЕННОСТИ КАЖДОГО ИЗ НИХ!

- (1) УСИЛИТЕЛИ
- (2) ГЕНЕРАТОРЫ
- (3) МОДУЛЯТОРЫ
- (4) ДЕМОДУЛЯТОРЫ
- (5) ФИЛЬТРЫ
- (6) ОПЕРАЦИОННЫЕ
УСИЛИТЕЛИ
- (7) ЛОГИЧЕСКИЕ
СХЕМЫ
- (8) ИСТОЧНИКИ
ПИТАНИЯ

8...

1.2. РАЗЛИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

<Усилители>



<Генераторы>

ТЕПЕРЬ О
ГЕНЕРАТОРАХ.

ЭТО СХЕМЫ,
КОТОРЫЕ
ГЕНЕРИРУЮТ?!

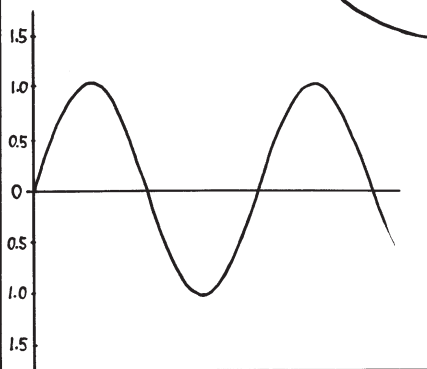
НУ, В ОБЩЕМ,
ПРАВИЛЬНО...

ГЕНЕРАТОР –
ЭТО ТАКОЕ
УСТРОЙСТВО...

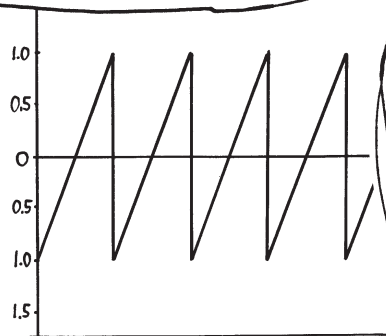
КОТОРОЕ СОЗДАЁТ
«НА РОВНОМ МЕСТЕ»
СИГНАЛ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА. ЕГО ИСПОЛЬЗУЮТ,
НАПРИМЕР, В МОБИЛЬНЫХ
ТЕЛЕФОНАХ...

АААА?

ОН МОЖЕТ ВЫРАБАТЫВАТЬ
ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ,
НАПРИМЕР, ГАРМОНИЧЕСКИЕ
ИЛИ ПИЛООБРАЗНЫЕ!



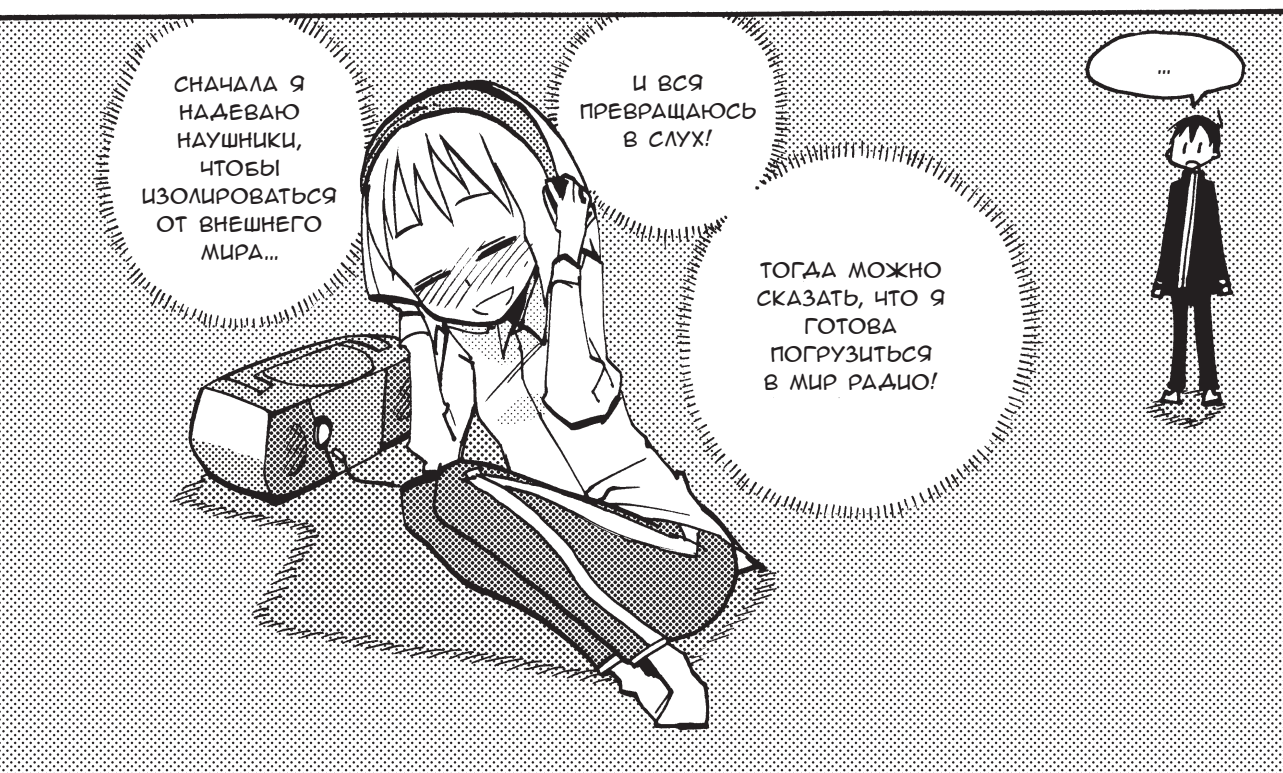
Гармоническая волна



Пилообразная волна

АА, УДОБНАЯ
ШТУКА!







АА,
ТВОЙ МЕТОД
ДЕЙСТВИТЕЛЬНО
ХОРОШ...

АА.



НО МНЕ КАЖЕТСЯ,
ЧТО СНАЧАЛА
НУЖНО ВКЛЮЧИТЬ
РАДИО И ВЫБРАТЬ
НУЖНЫЙ КАНАЛ
ПОВОРОТОМ РУЧКИ
РЕГУЛЯТОРА.

АХ!



УСТРОЙСТВО, КОТОРОЕ
ВЫДЕЛЯЕТ СИГНАЛ ЧАСТОТЫ
ТОЙ РАДИОСТАНЦИИ,
КОТОРУЮ МЫ ХОТИМ
ПОСЛУШАТЬ, И ЕСТЬ ФИЛЬТР!

ПОНЯТНО!



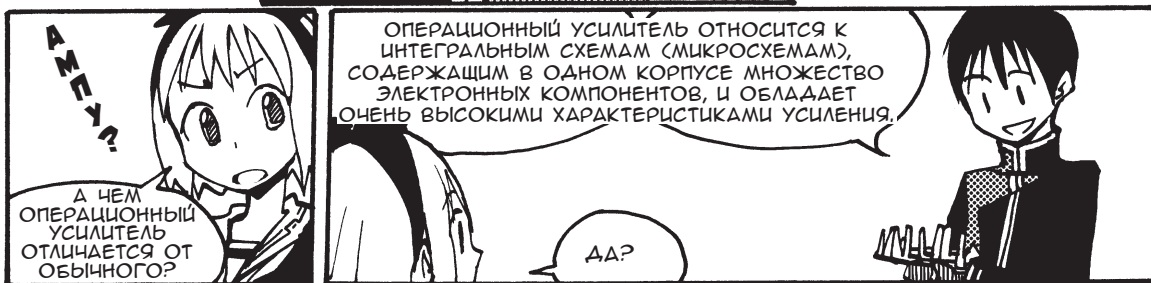
ВОТ, НАПРИМЕР,
КОФЕ.
Я ОТЦЕЖИВАЮ
ЕГО ПРИ
ПОМОЩИ
ФИЛЬТРА.

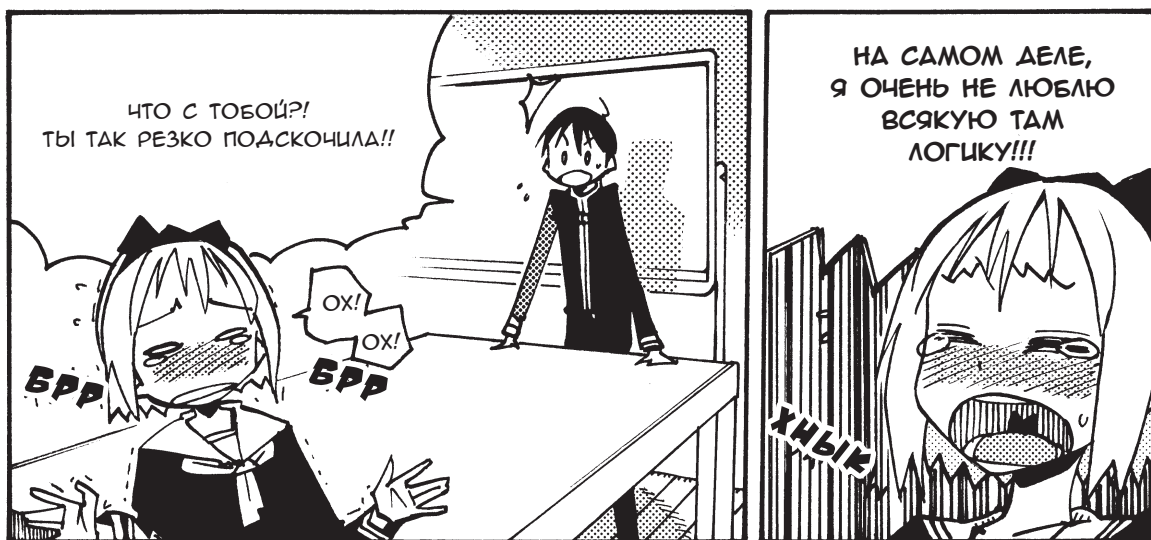
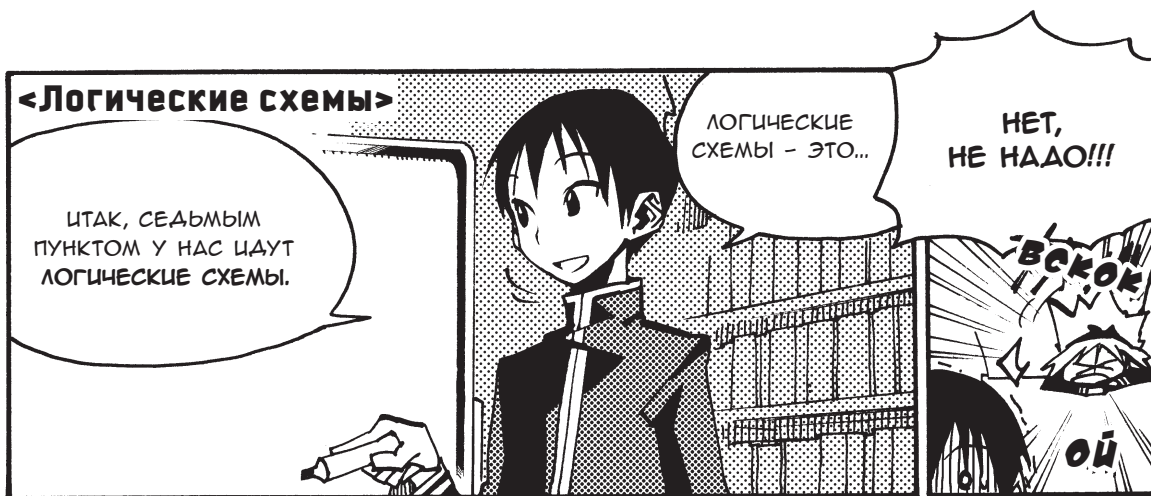
И ЭТО ТО ЖЕ САМОЕ.

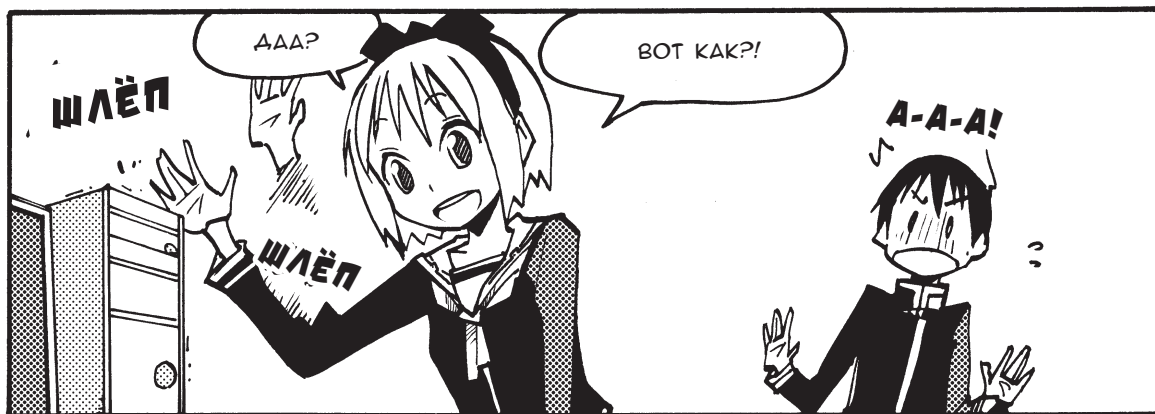
АААА?

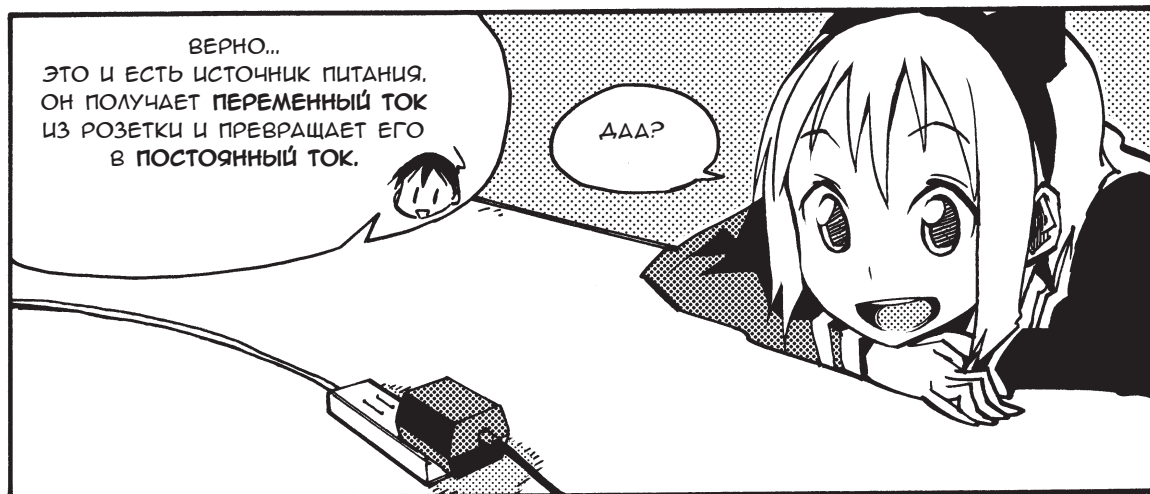
КАК
ХОЧЕТСЯ
КОФЕЙКУ...

КАП
КАП



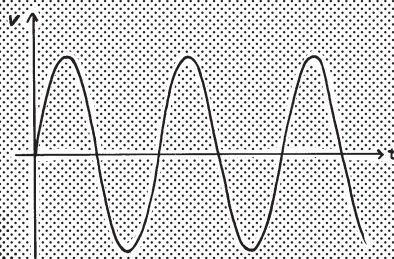






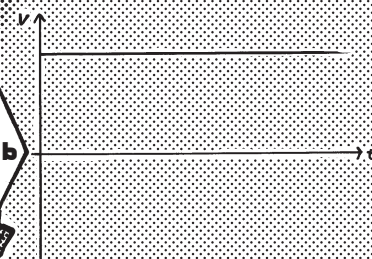
ЧТОБЫ ПРЕВРАТИТЬ
ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК В
ПОСТОЯННЫЙ, НАДО СНАЧАЛА
С ПОМОЩЬЮ ВЫПРЯМИТЕЛЯ
ОТРЕЗАТЬ ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ
СОСТАВЛЯЮЩУЮ НАПРЯЖЕНИЯ,
ЗАТЕМ СГЛАДИТЬ ВОЛНУ
С ПОМОЩЬЮ СГЛАЖИВАЮЩЕГО
ФИЛЬТРА...

...И НА ВЫХОДЕ ПОЛУЧИТСЯ
СТАБИЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ
ПОСТОЯННОГО ТОКА.



(а) Переменный ток

Выпрямитель



(б) Постоянный ток



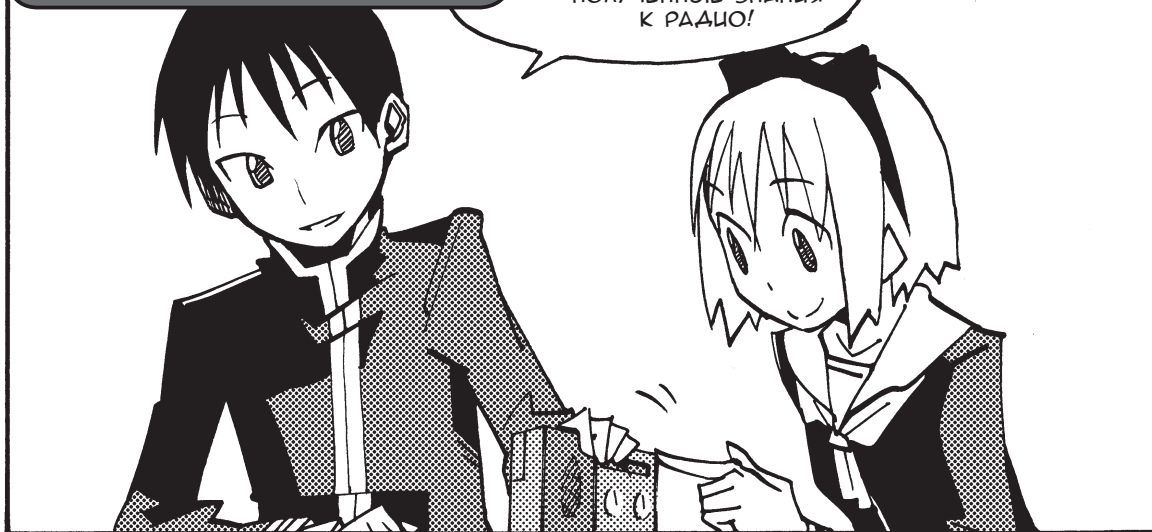
ПРАВДААА?



ВОТ И ВСЁ, ЧТО
ПРОИСХОДИТ
ВНУТРИ
АС-АДАПТЕРА.

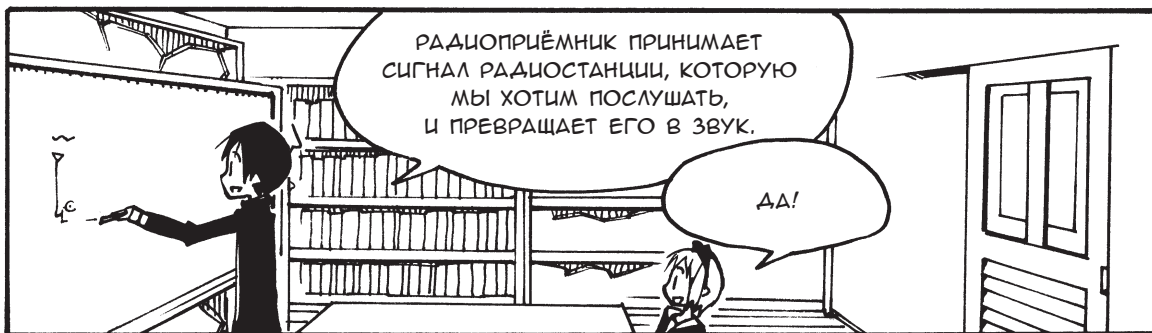
1.3. ПРОСТЕЙШИЙ ПРИМЕР РАДИОПРИЁМНИКА

ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ
ПРИМЕНИТЬ
ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАНИЯ
К РАДИО!



РАДИОПРИЁМНИК ПРИНИМАЕТ
СИГНАЛ РАДИОСТАНЦИИ, КОТОРУЮ
МЫ ХОТИМ ПОСЛУШАТЬ,
И ПРЕВРАЩАЕТ ЕГО В ЗВУК.

ДА!



ПРОСТЕЙШАЯ СТРУКТУРНАЯ
СХЕМА РАДИОПРИЁМНИКА...

...ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК.

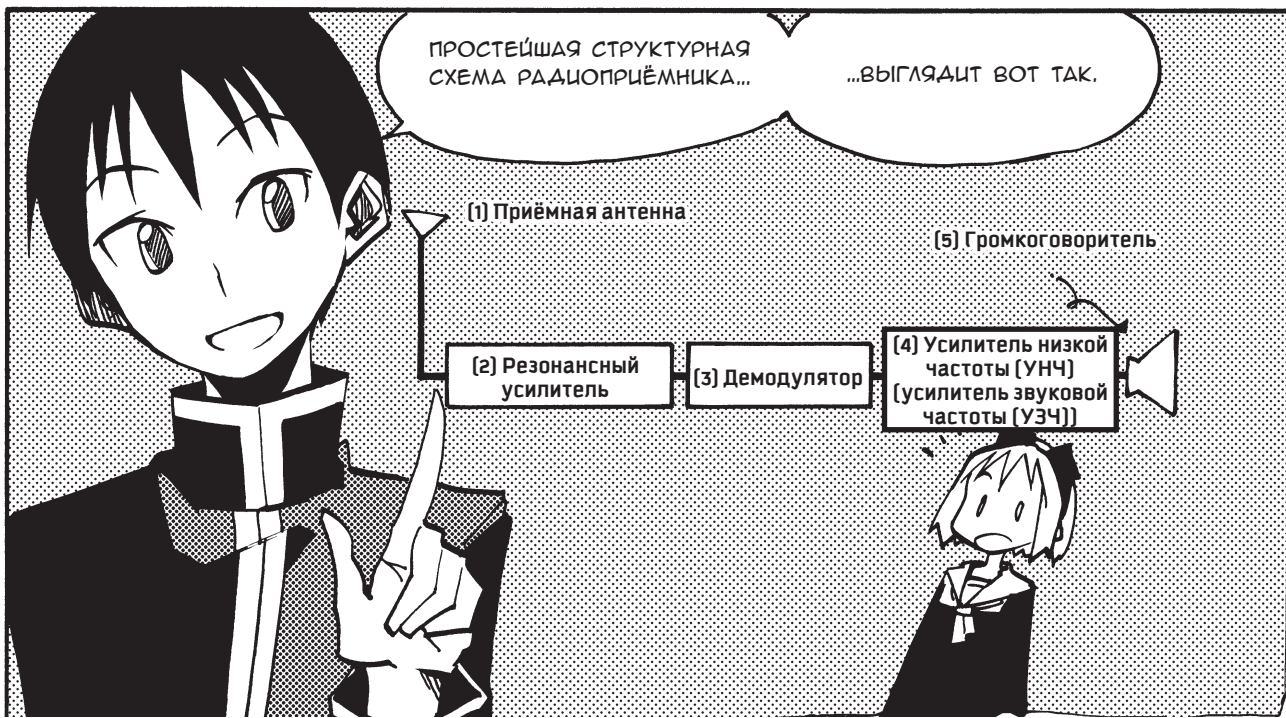
(1) Приёмная антенна

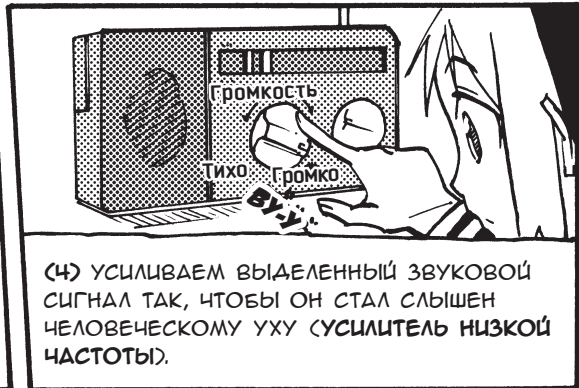
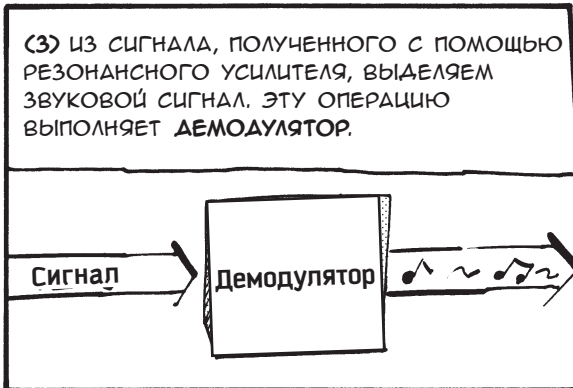
(5) Громкоговоритель

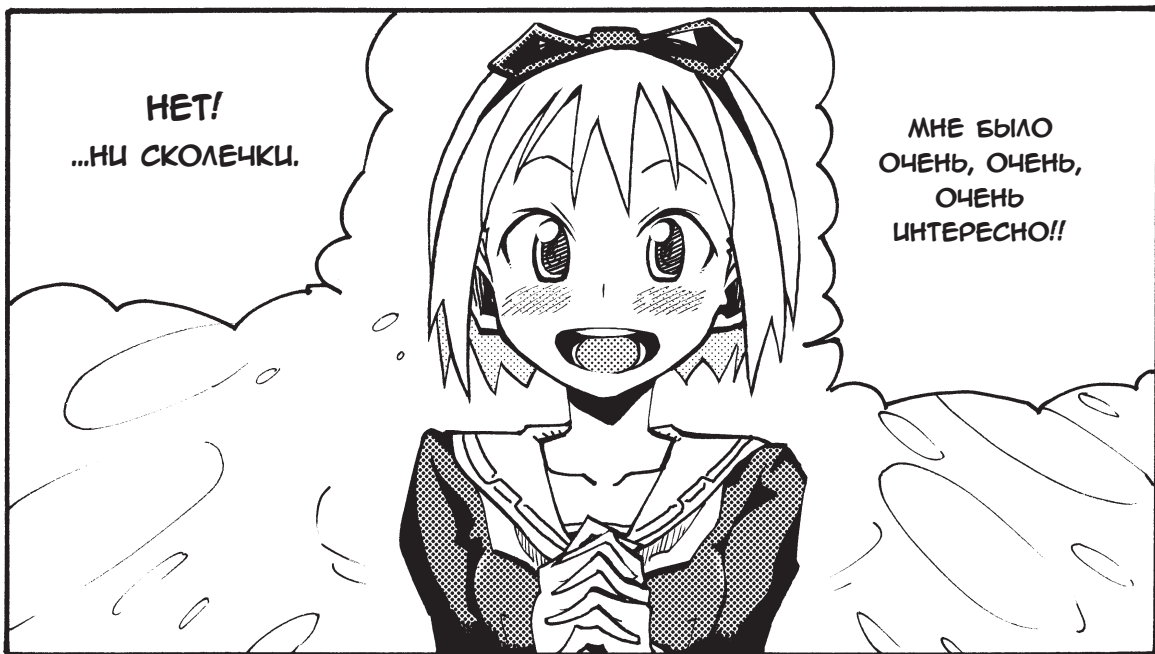
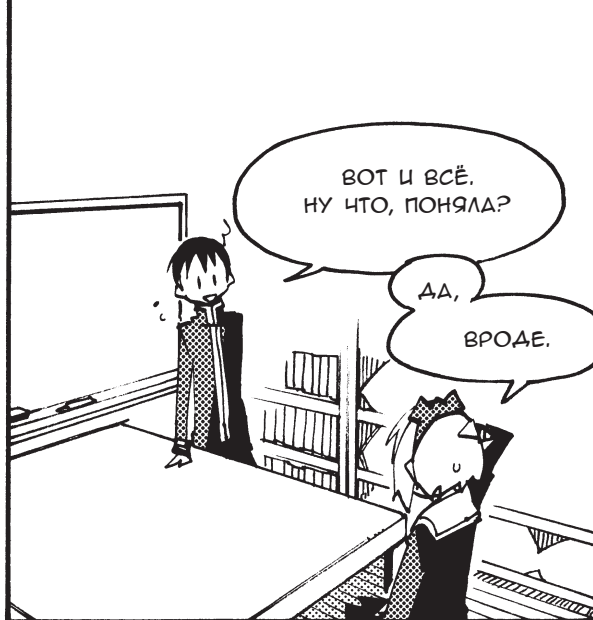
(2) Резонансный
усилитель

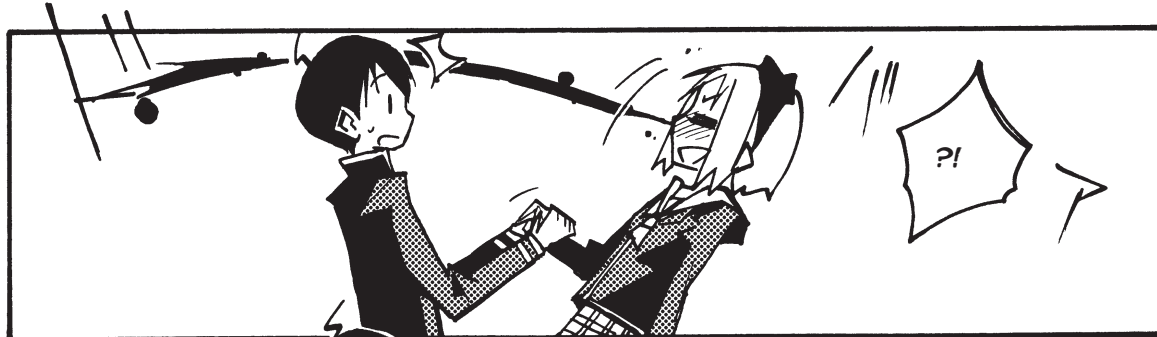
(3) Демодулятор

(4) Усилитель низкой
частоты (УНЧ)
(усилитель звуковой
частоты (УЗЧ))









Операционный усилитель – совершенная схема усиления

На рис. 1-A1 показан операционный усилитель. Он имеет следующие свойства:

1. Необычайно высокий коэффициент усиления ($K \geq 2 \times 10^5$).
2. Возможность реализации **виртуальной земли** (можно подключить к земле вывод u_+ и считать **разность потенциалов** между u_+ и u_- равной 0).
3. Низкий выходной импеданс (это также является условием реализации пункта 2).

На основе этих трёх свойств можно создавать разнообразные схемы. Например, подключив R и C , как показано на рис. 1-A2, мы получим интегратор. Другими словами, выходное напряжение здесь будет пропорционально интегралу от входного напряжения. Если же поменять R и C местами, как показано на рис. 1-A3, то получится схема, обладающая свойствами **дифференциатора**.

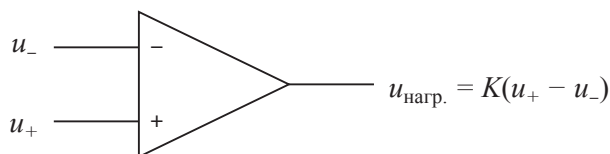
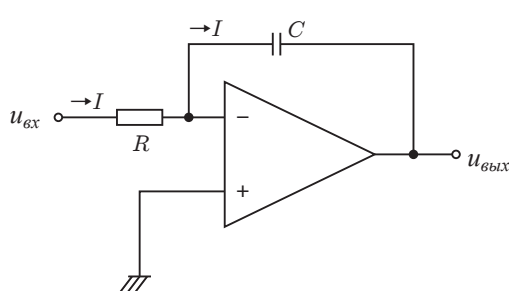
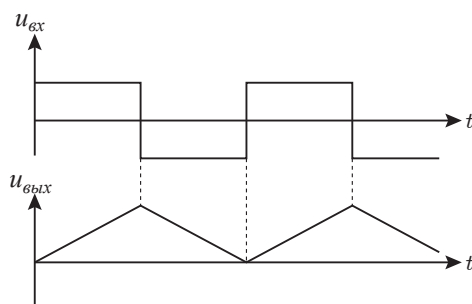


Рис. 1-A1 Обозначение операционного усилителя на схемах



(а) Принципиальная схема



(б) Формы входного и выходного сигналов

Рис 1-A2 Интегратор

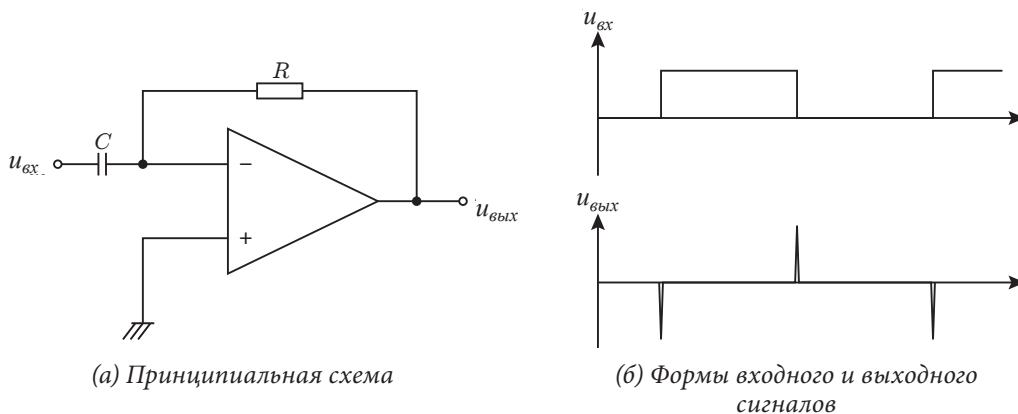


Рис. 1-А3 Дифференциатор

Далее, на рис. 1-А4 показана схема, которая называется **генератором с мостом Вина**. В этой схеме всего лишь подают выходное напряжение обратно на входы по цепям обратной связи, но это позволяет получить на выходе гармоническую волну. Многие из генераторов переменного тока, которые вы можете встретить в лабораториях университетов или ПТУ, выполнены именно по этой схеме.

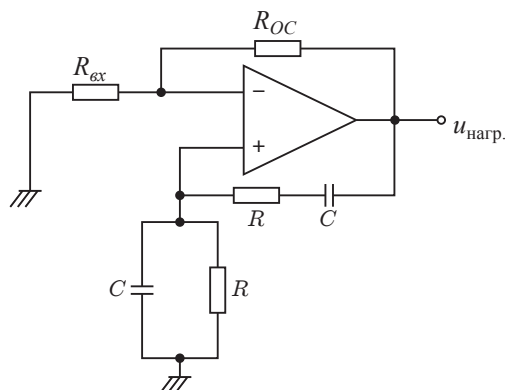


Рис. 1-А4 Генератор с мостом Вина

Таким образом, операционный усилитель используется в различных схемах.

Логические схемы

Как уже упоминалось, логические схемы входят в состав компьютеров, где они используются для выражения цифр «0» и «1». Здесь цифре «0» (логическому нулю) соответствует низкий уровень напряжения, например, 0 В (вольт), а цифре «1» (логической единице) – высокий уровень напряжения, такой как 5 В. Логические схемы в качестве сигналов обрабатывают эти два уровня напряжения (такой режим называется положительной логикой), поэтому состоящие из них устройства иногда называют **цифровыми схемами**.

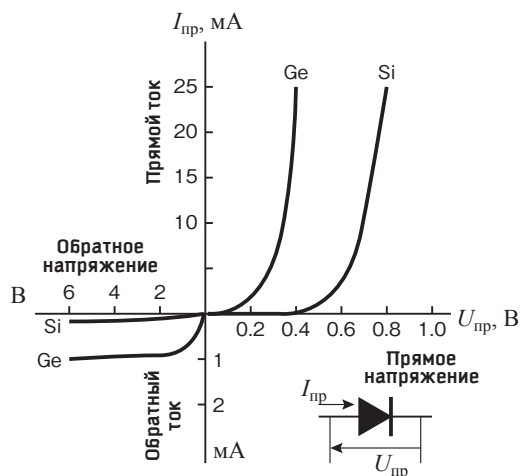


Рис. 1-А5 Диод

На рис. 1-А5 показан **диод**. У диода есть свойство пропускать ток только в направлении, указанном вершиной треугольника, и не пропускать ток в обратном направлении. Используя это свойство, можно реализовать, например, **логическое сложение (ИЛИ)**, **логическое умножение (И)**.

На рис. 1-А6 показана **схема логического умножения (логическая схема «И»)**. Здесь, если на оба входа *A* и *B* подать «1», то на выходе тоже будет «1». Дело в том, что в этом состоянии ни к одному из диодов не приложено прямого напряжения – они будут закрыты (то есть не будут пропускать ток), поэтому выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будет таким же, как напряжение питания $U_{\text{пит}}$, что соответствует логической «1». Однако если хотя бы на один из входов (или на оба входа) подать «0», то соответствующий диод (или оба диода) откроется, напряжение между его выводами резко снизится – выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ тоже будет низким, что соответствует логическому «0».

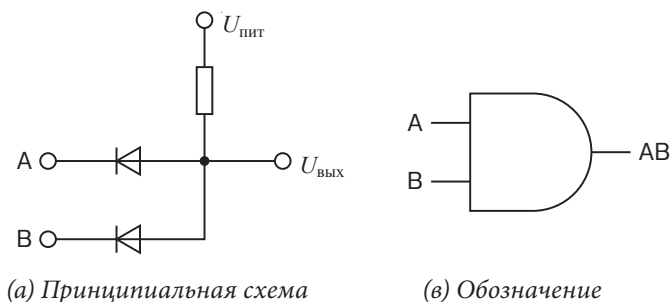


Рис. 1-А6 Логическая схема «И»

На рис. 1-A7 показана **логическая схема сложения** (логическая схема «ИЛИ»). Здесь, если хотя бы на один из входов A или B подать «1», то на выходе тоже будет «1», однако если на оба входа подать «0», то и на выходе будет «0». Дело в том, что если к одному из диодов (или к обоим диодам) приложить прямое напряжение, то диод (или оба диода) откроется, в цепи потечёт ток, поэтому выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемое с резистора, будет высоким, что соответствует уровню «1». Однако если ни к одному из диодов не приложено прямое напряжение, то оба они закрыты, тока в цепи нет, напряжение на резисторе падать не будет, поэтому выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будет соответствовать логическому «0».

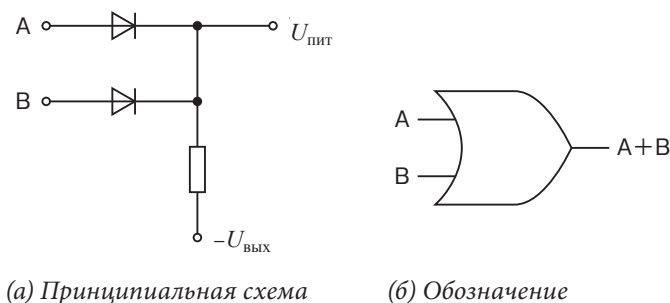


Рис. 1-A7 Логическая схема «ИЛИ»

На рис. 1-A8 приведена **логическая схема отрицания** (логическая схема «НЕ»). Здесь, если на вход A подать «0», на выходе будет «1», и наоборот, если на вход подать «1», то на выходе будет «0». Построить такую схему на одних диодах и резисторах не получится – придётся использовать транзистор. Работает она так. Если между базой и эмиттером (то есть на эмиттерный переход) приложить открывающее напряжение, то через эмиттерный переход потечёт прямой ток – транзистор откроется, поэтому выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемое с коллектора и эмиттера, будет низким (логический «0»). Напротив, если к эмиттерному переходу не прикладывать открывающего напряжения, то тока через эмиттерный переход не будет – транзистор закрыт, и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ соответствует напряжению питания $U_{\text{пит}}$. (логическая «1»).

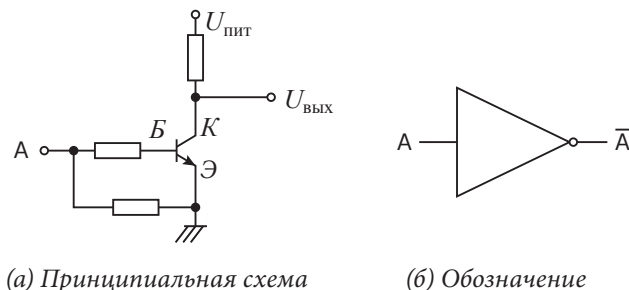
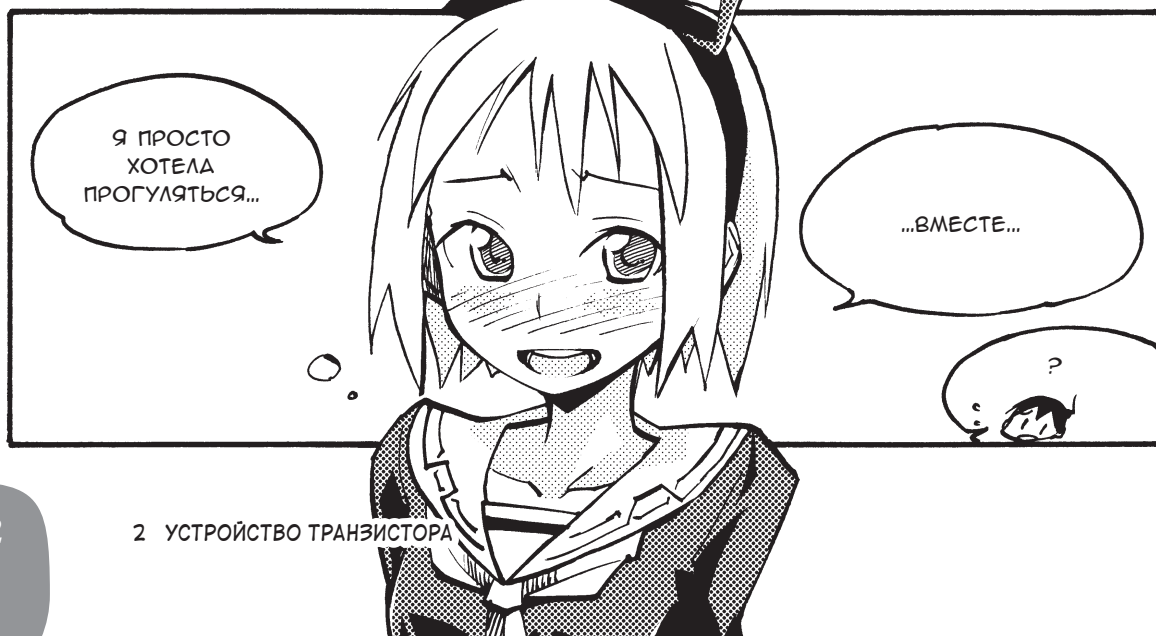
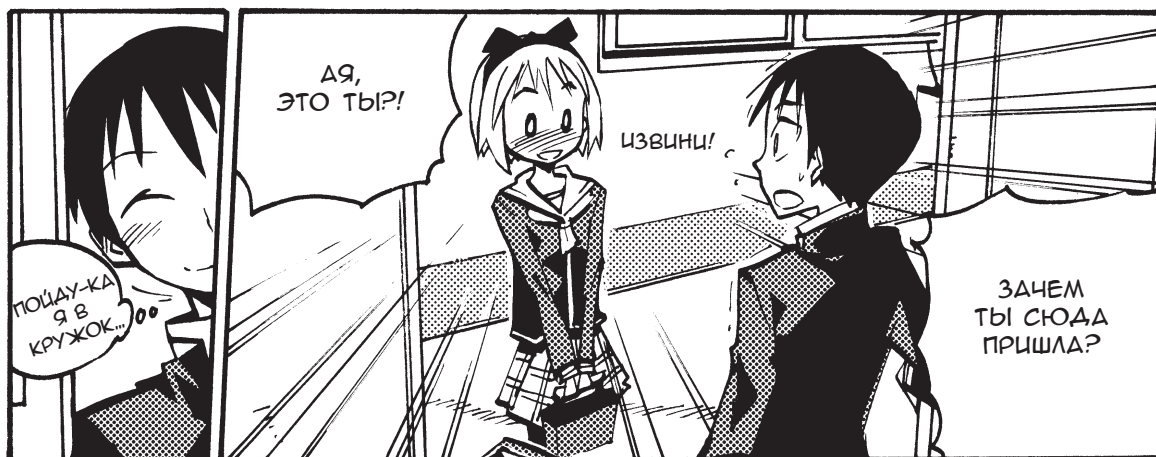
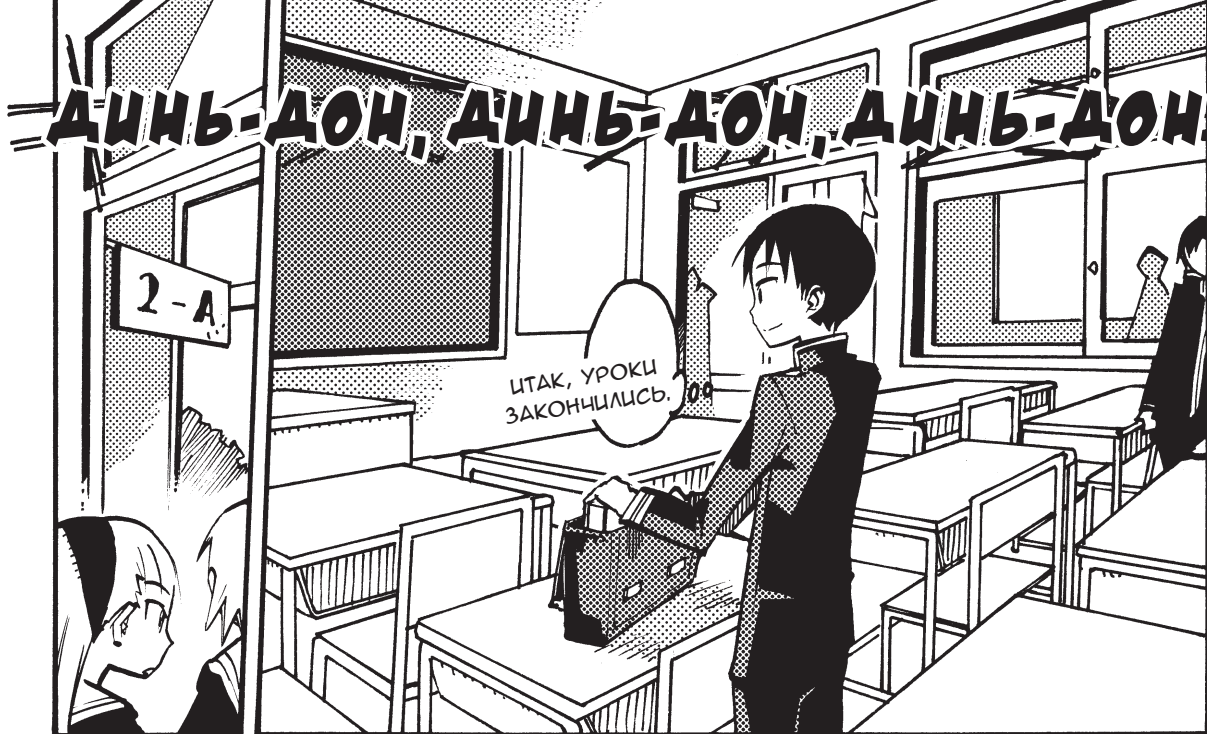


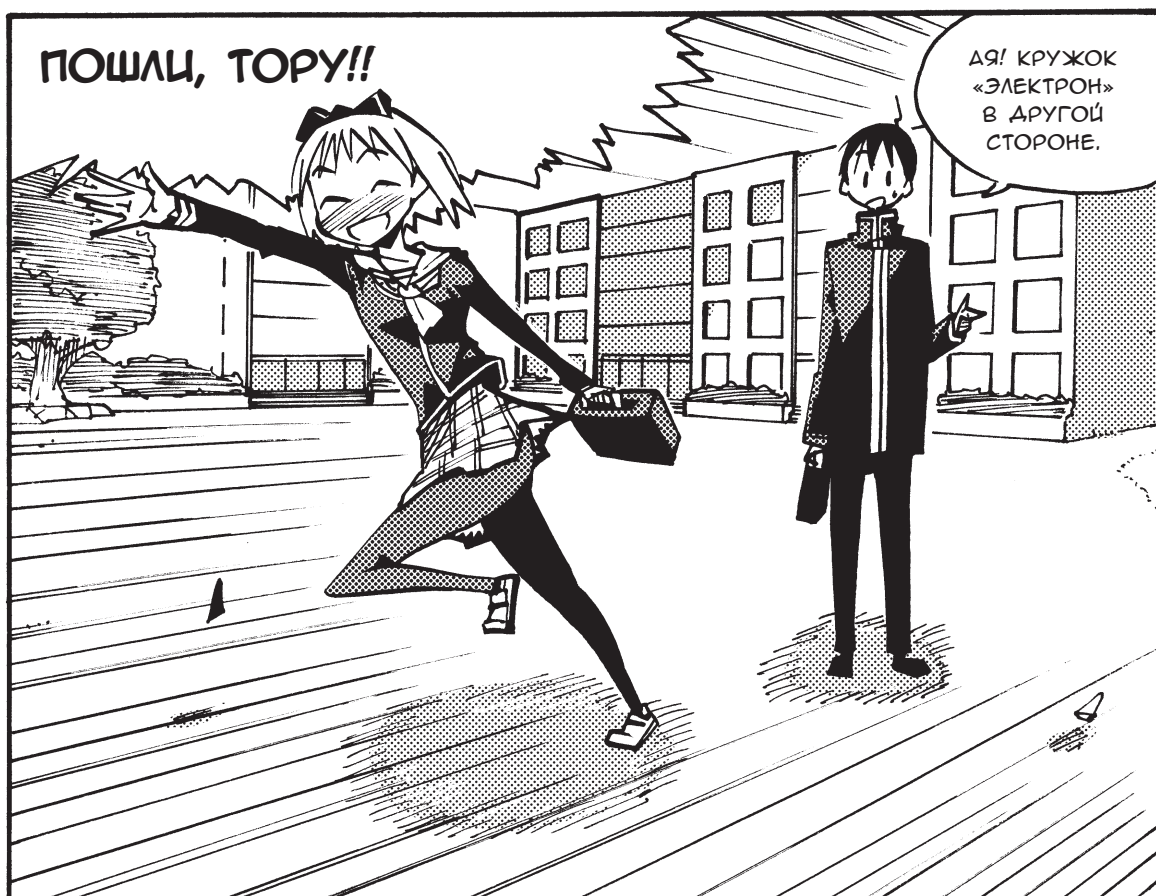
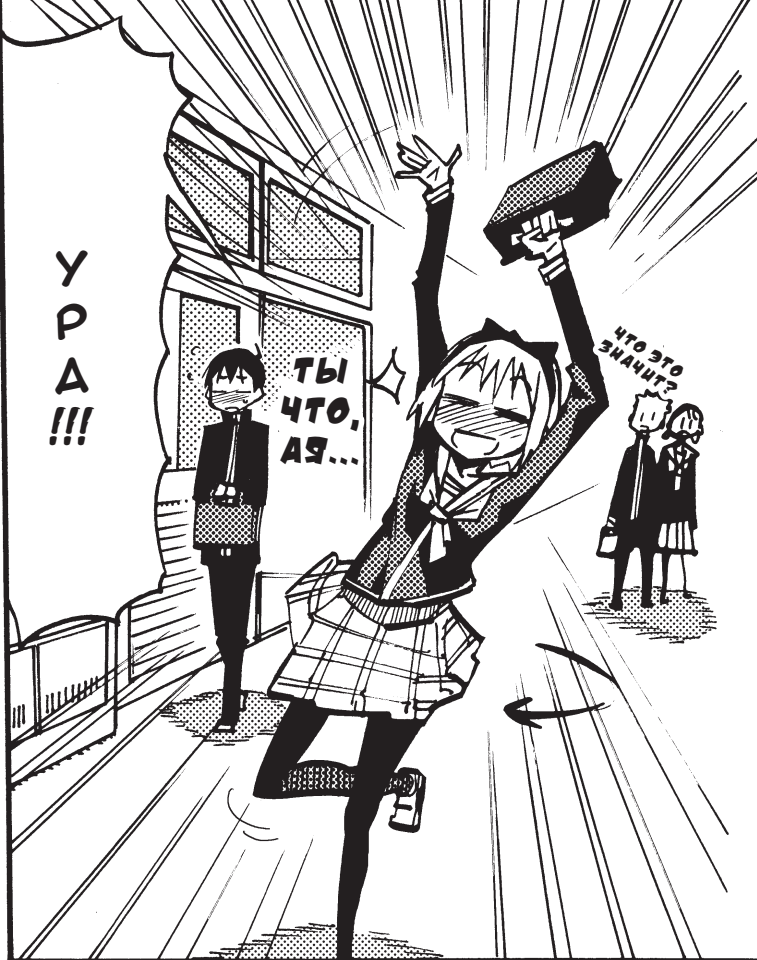
Рис. 1-A8 Логическая схема «НЕ»

2
ГЛАВА

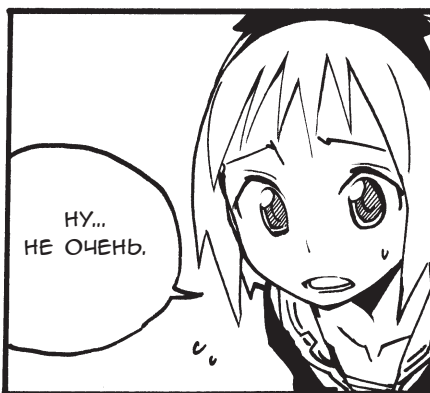
УСТРОЙСТВО ТРАНЗИСТОРА







2.1. ЧТО ТАКОЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ?



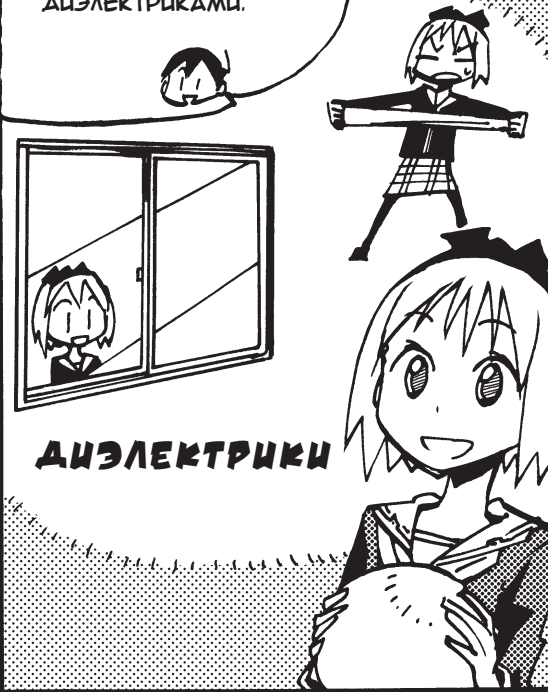
ВО-ПЕРВЫХ,

ПРОВОДНИКИ - ЭТО
ТАКИЕ ВЕЩЕСТВА,
КОТОРЫЕ ХОРОШО
ПРОВОДЯТ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК,
НАПРИМЕР, МЕТАЛЛЫ.



С ДРУГОЙ
СТОРОНЫ

ТАКИЕ ВЕЩЕСТВА,
КАК СТЕКЛО, РЕЗИНА,
КОТОРЫЕ ПЛОХО
ПРОВОДЯТ ТОК,
НАЗЫВАЮТ
ДИЭЛЕКТРИКАМИ.



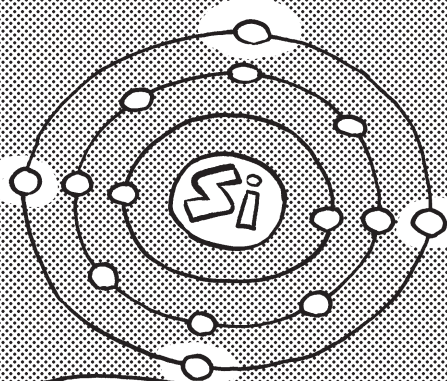
А ПОЛУПРОВОДНИКИ - ЭТО
ВЕЩЕСТВА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ
СВОЙСТВАМИ.

НАПРИМЕР, КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТРАНЗИСТОРАХ,
ЯВЛЯЮТСЯ ПОЛУПРОВОДНИКАМИ.

ПРОМЕЖУТОЧ-
НЫМИ...

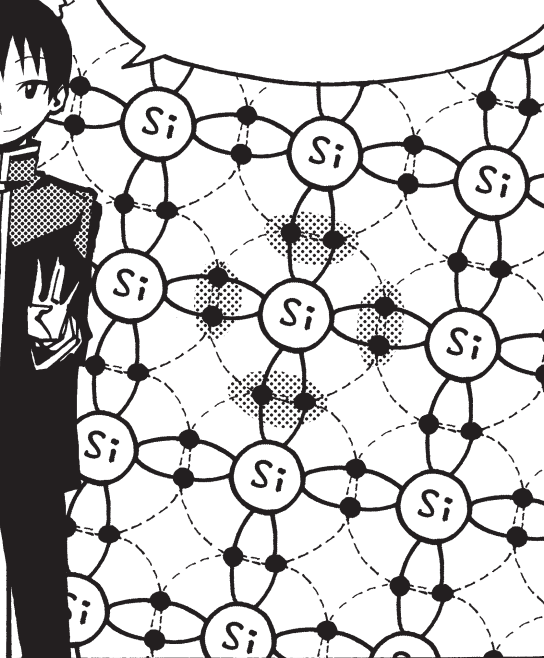


«Ковалентные связи между атомами кремния»



И КАЖДАЯ ИЗ АТОМОВ КРЕМНИЯ ПРЕДОСТАВЛЯЕТ СОСЕДАМ АТОМАМ ПО 4 ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНА - ФОРМИРУЕТСЯ КОВАЛЕНТНЫЙ КРИСТАЛЛ.

КРЕМНИЙ - ЭТО ЭЛЕМЕНТ 14 ГРУППЫ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЕ, ПОЭТОМУ НА ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКЕ ОН ИМЕЕТ 4 ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНА.



АТОМЫ КРЕМНИЯ В ЭТОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ МОЖНО УПОДОБИТЬ ЛЮДЯМ, КРЕПКО ДЕРЖАЩИМ ДРУГ ДРУГА ЗА РУКИ....



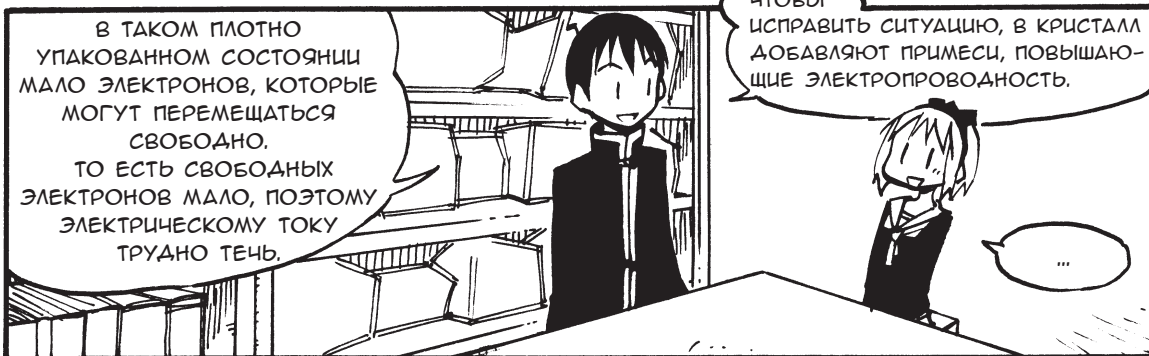
ВОТ В ТАКОМ ОНИ СОСТОЯНИИ. ПОНЯТНО?

(ЗЕВАЕТ)



В ТАКОМ ПЛОТНО УПАКОВАННОМ СОСТОЯНИИ МАЛО ЭЛЕКТРОНОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ ПЕРЕМЕЩАТЬСЯ СВОБОДНО. ТО ЕСТЬ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ МАЛО, ПОЭТОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ ТРУДНО ТЕЧЬ.

ЧТОБЫ ИСПРАВИТЬ СИТУАЦИЮ, В КРИСТАЛЛ ДОБАВЛЯЮТ ПРИМЕСИ, ПОВЫШАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ.





Группы

Периоды

ЗДЕСЬ ПОД ПРИМЕСЯМИ ИМЕЮТСЯ В ВИДУ ЭЛЕМЕНТЫ 13-й ГРУППЫ, А ТАКЖЕ ЭЛЕМЕНТЫ 15-й ГРУППЫ.

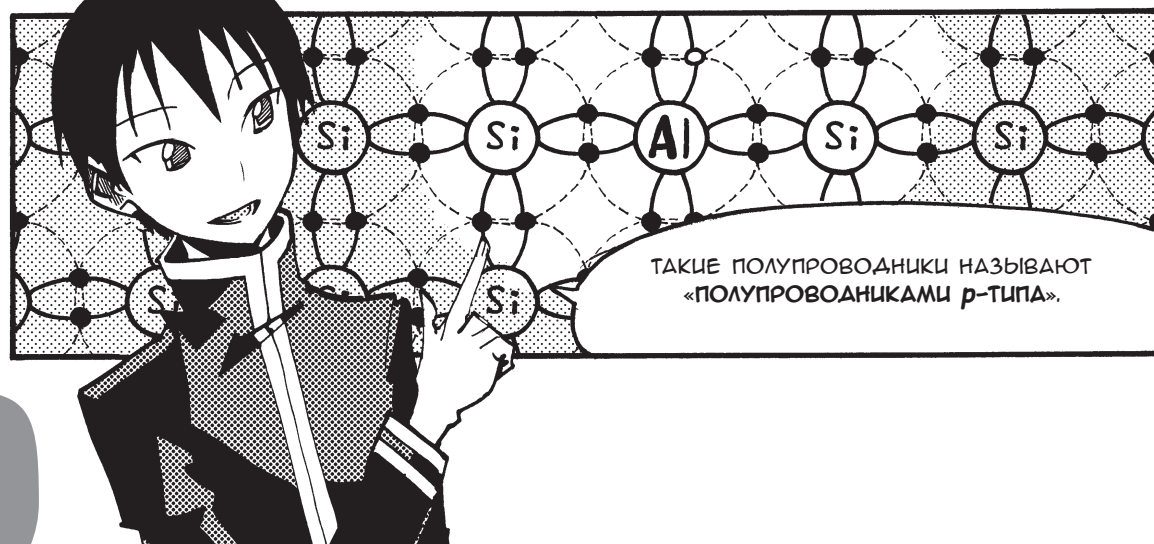
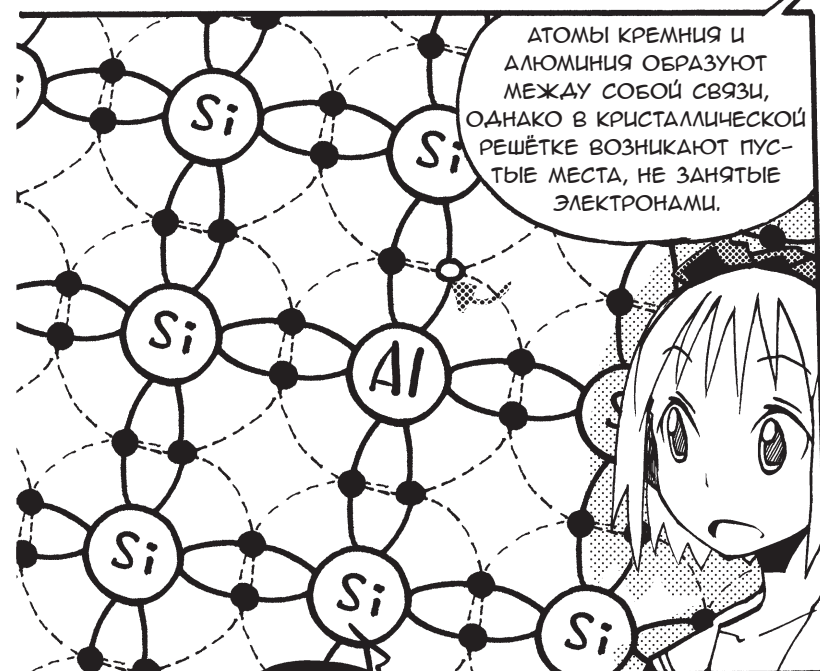
элементы

1	2											18					
1 H	2 He																
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	* * *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	** **	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112	113	114	115	116	117	118

*Лантаноиды

**Актиноиды

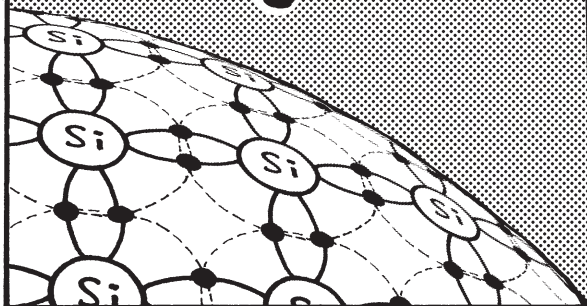
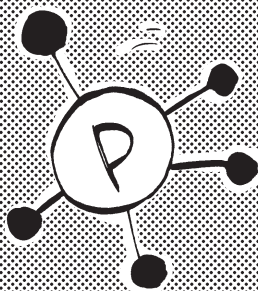
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



<Полупроводники n-типа>

ТЕПЕРЬ
ПОПРОБУЕМ
ДОБАВИТЬ ФОСФОР
ЭЛЕМЕНТ 15-й ГРУППЫ,
ИМЕЮЩИЙ 5 ВАЛЕНТНЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ, ТО ЕСТЬ
НА ОДИН ВАЛЕНТНЫЙ
ЭЛЕКТРОН БОЛЬШЕ,
ЧЕМ У КРЕМНИЯ!

ДАВАЙ!



АТОМЫ КРЕМНИЯ И ФОСФОРА
ОБРАЗУЮТ МЕЖАУ СОБОЙ
СВЯЗИ, ОДНАКО ОДИН
ВАЛЕНТНЫЙ ЭЛЕКТРОН
ОКАЖЕТСЯ ЛИШНИМ И СТАНЕТ
СВОБОДНЫМ ЭЛЕКТРОНОМ.

ЭТОТ
ЭЛЕКТРОН
ЗДЕСЬ ЛИШНИЙ,
ПОЭТОМУ ОН
ХОЧЕТ БЫТЬ
СВОБОДНЫМ.

ПОЭТОМУ В ЭТОМ
ПОЛУПРОВОДНИКЕ ТОЖЕ
ПОВЫШАЕТСЯ
ЭЛЕКТРОПРОВОДАНОСТЬ!

ВОТ ЧТО ДАЁТ
ПРИМЕСЬ!

ТАКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ НАЗЫВАЮТСЯ
«ПОЛУПРОВОДНИКАМИ n-ТИПА».

ААА?

2.2. ДИОДЫ С *p-n*-ПЕРЕХОДОМ

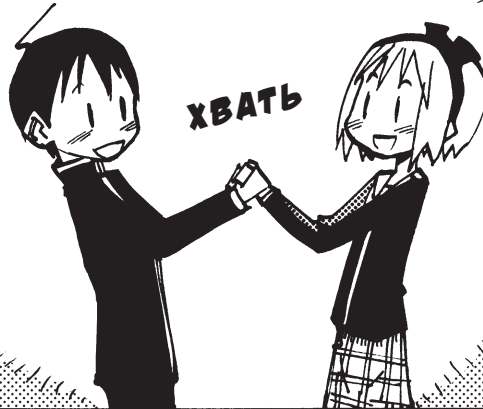
ЕСЛИ СОСТЫКОВАТЬ
МЕЖДУ СОБОЙ
ПОЛУПРОВОДНИКИ *p*-ТИПА
И ПОЛУПРОВОДНИКИ
n-ТИПА, ТО МОЖНО
СДЕЛАТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ, ТАКИЕ КАК
ДИОДЫ,
ТРАНЗИСТОРЫ.
ЭТО МЕСТО СТЫКА
НАЗЫВАЕТСЯ
p-n-ПЕРЕХОДОМ.



ЗНАЧИТ, ЕСЛИ ТЫ
p-ТИП, А Я *n*-ТИП, ...

ХВАТЬ

ЧТО?



НЕТ, ЭТО НЕ ТАК!
Я НА САМОМ ДЕЛЕ
m-ТИПА!!
ВО МНЕ *s*-ТИПА НЕТ
НИ КАПЕЛЬКИ!!

АХ

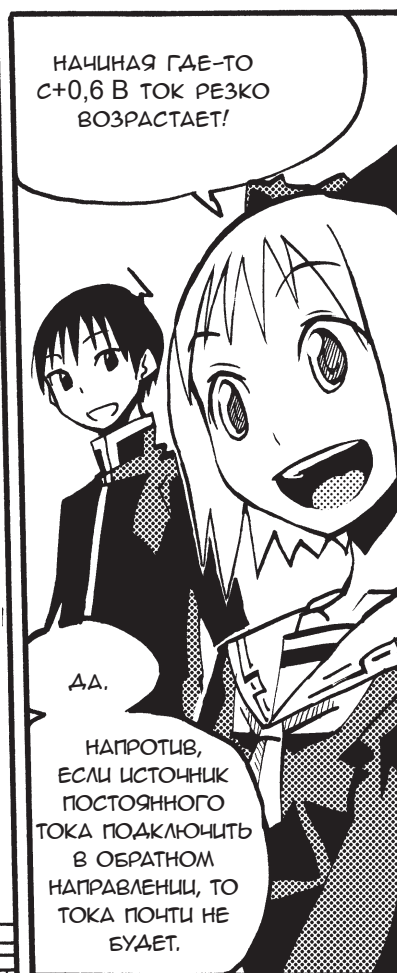
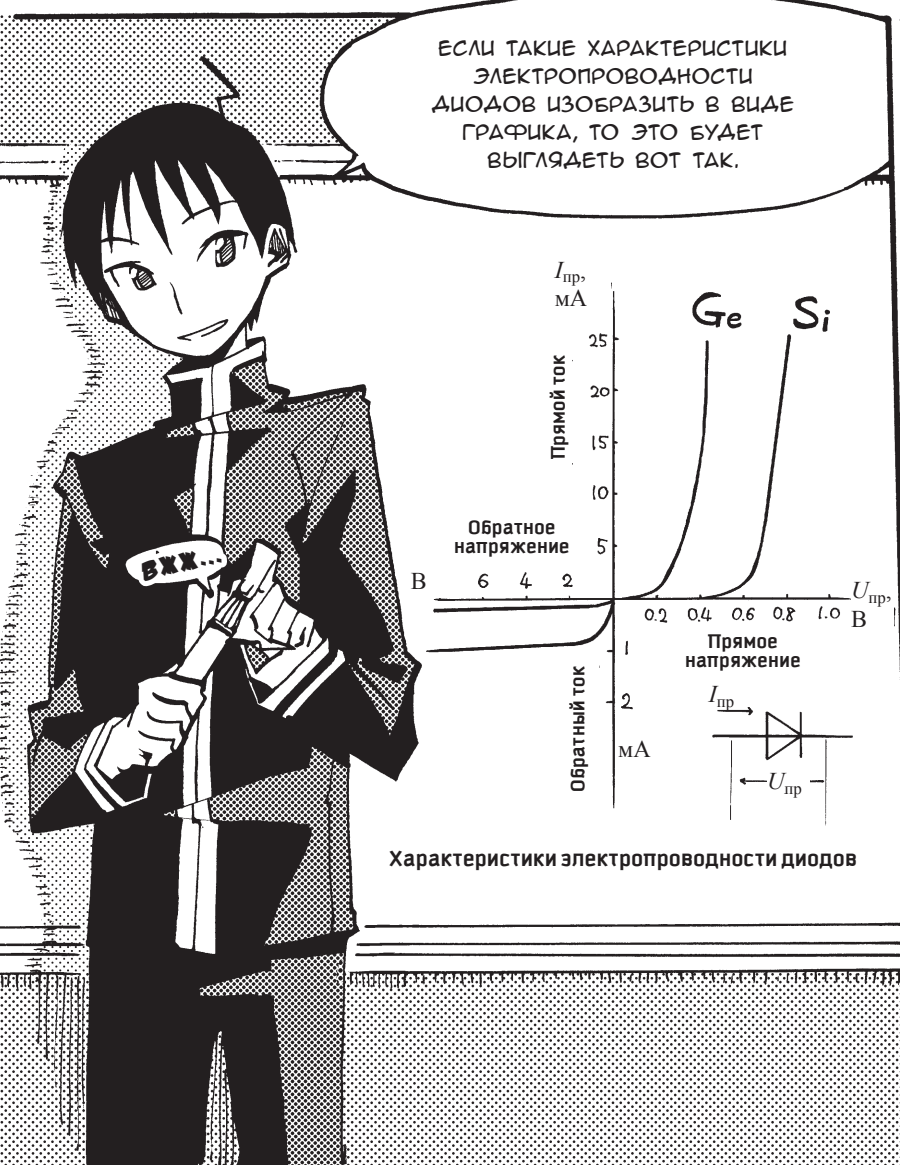


ЧТО ТЫ НЕСЁШЬ?
МЫ ВЕДЬ ГОВОРИМ
О «*p*» И «*n*» ТИПАХ..!

АА?!

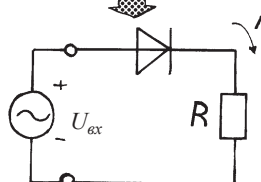






<Выпрямитель>

ИСПОЛЬЗУЯ ЭТО СВОЙСТВО,
МОЖНО СОЗДАТЬ ВЫПРЯМИТЕЛЬ,
ПРОПУСКАЮЩИЙ ТОК ТОЛЬКО В
ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ.



ЭТО ЖЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
В ПОСТОЯННЫЙ!

КСТАТИ,

ЗНАЕШЬ ЛИ ТЫ,
ЧТО ОЗНАЧАЮТ БУКВЫ
«р» и «n» В НАЗВАНИЯХ
ТИПОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ?

НЕТ, И ЧТО?

«р» ОЗНАЧАЕТ «POSITIVE»,
ТО ЕСТЬ
«ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ».

«n» ОЗНАЧАЕТ
«NEGATIVE»,
ТО ЕСТЬ
«ОТРИЦА-
ТЕЛЬНЫЙ»!

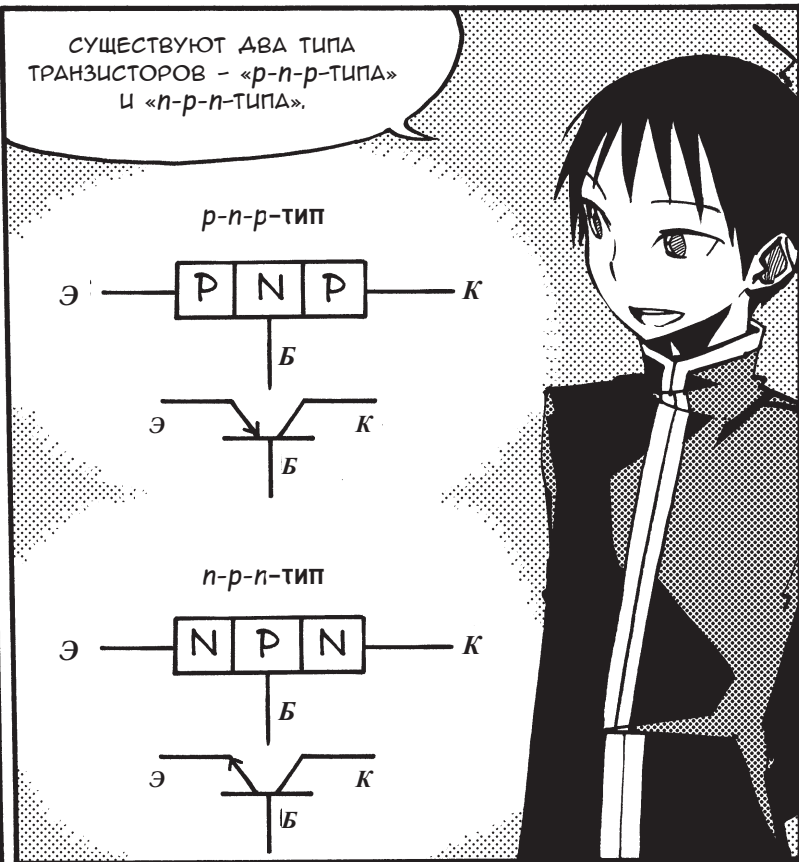
СВЕРК!

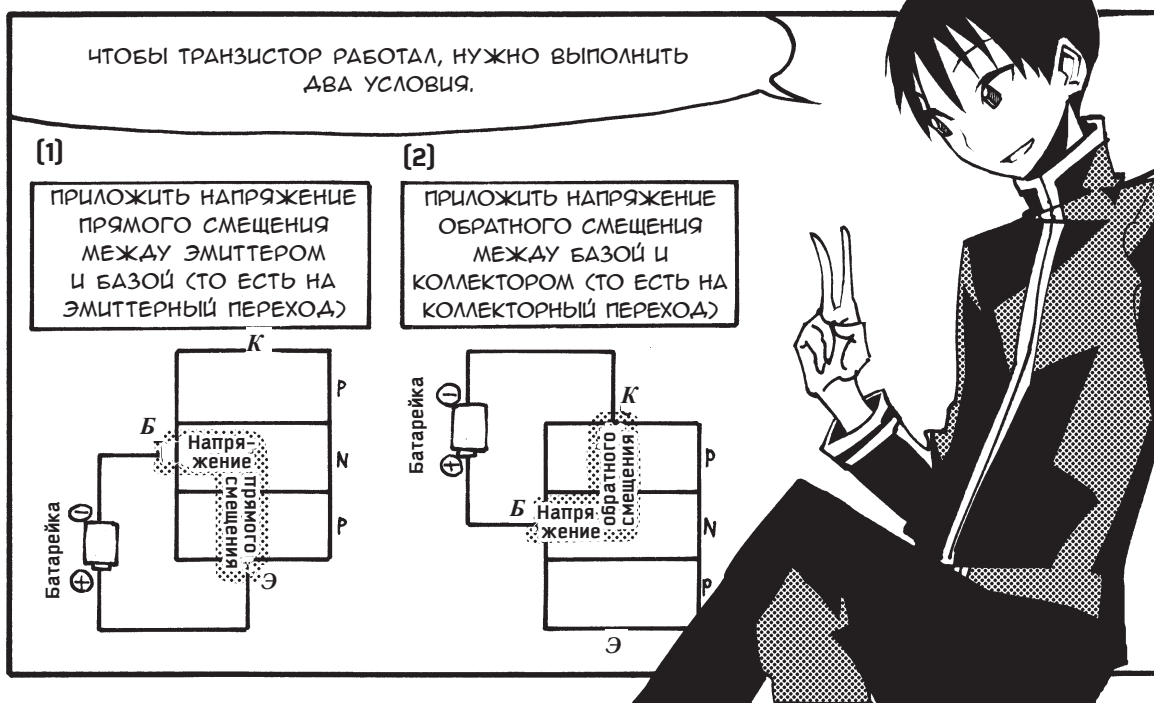
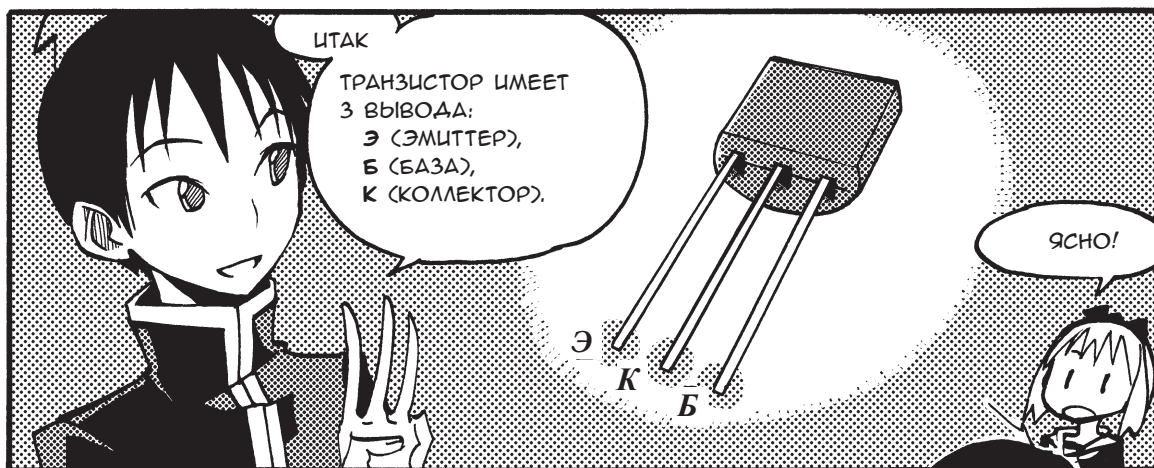
ЗНАЧИТ, ЭТО ПОЗИТИВ

И НЕГАТИВ...?

НУ ТЫ
ДАЁШЬ...

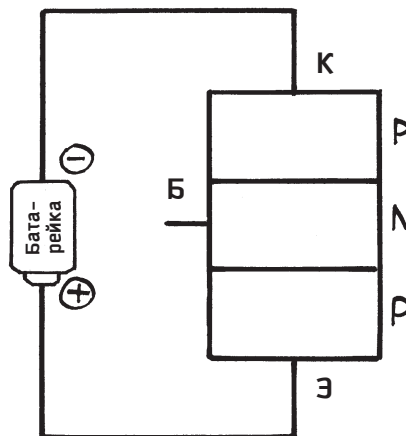
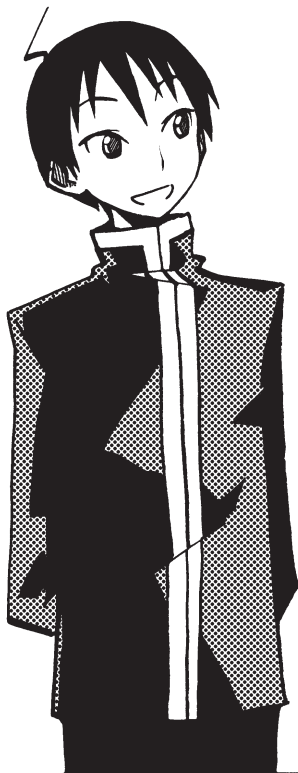
2.2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ





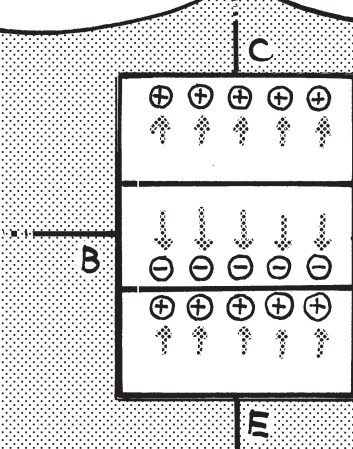
<Транзисторы $p-n-p$ -типа>

ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ
ПОДКЛЮЧИТЬ ТРАНЗИСТОР
 $p-n-p$ -ТИПА



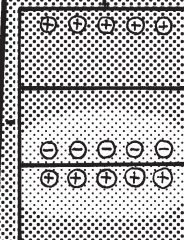
ДЫРКИ ВНУТРИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ
 p -ТИПА БУДУТ
ДВИГАТЬСЯ К
МИНУСОВОМУ ПОЛЮСУ
БАТАРЕЙКИ,...

...А ЭЛЕКТРОНЫ
ВНУТРИ
ПОЛУПРОВОДНИКА
 n -ТИПА - К
ПЛЮСОВОМУ.



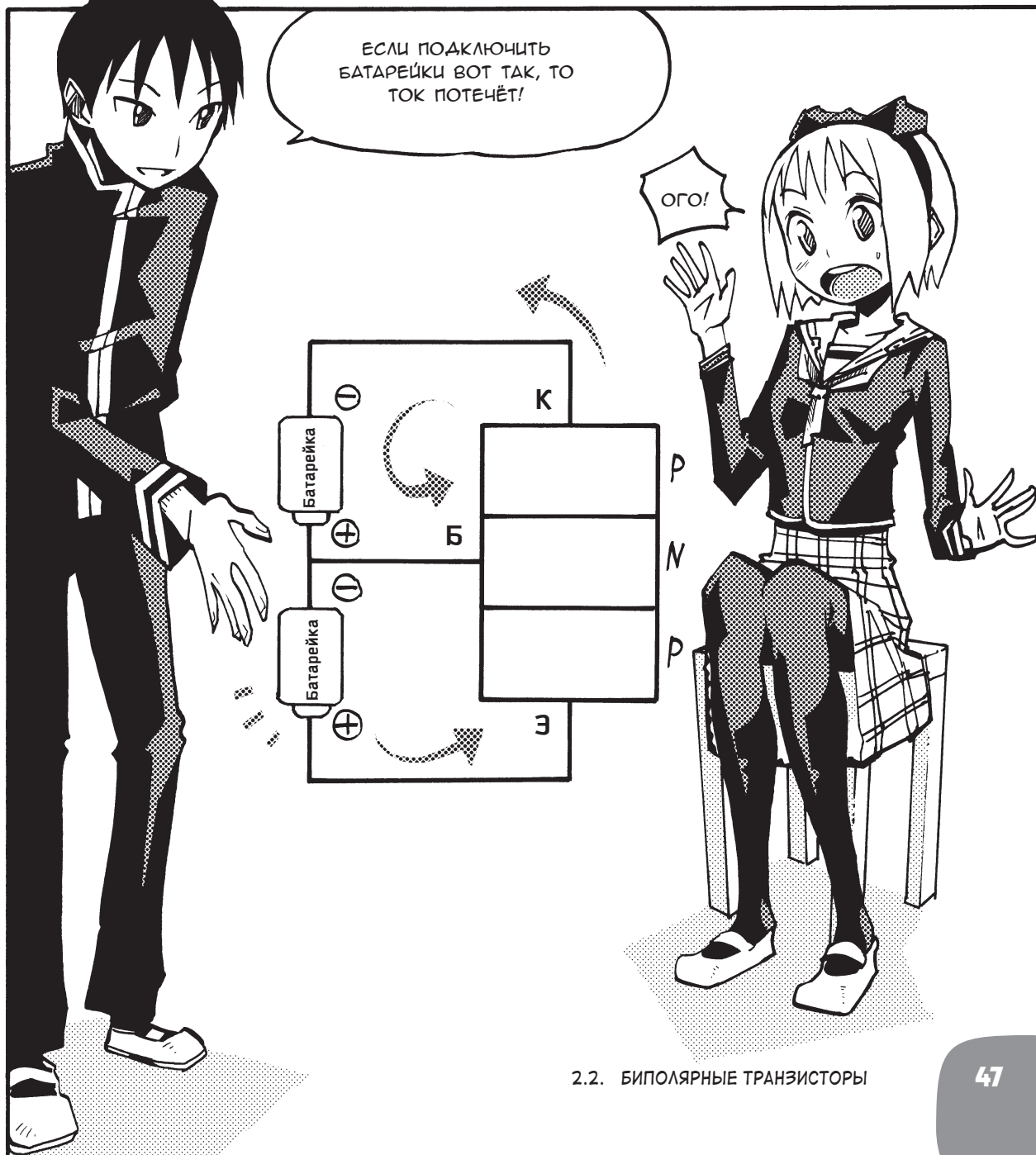
ОДНАКО ЕСЛИ
ОГРАНИЧИТЬСЯ
ТОЛЬКО ЭТИМ,
В ОБЛАСТИ
 $p-n$ -ПЕРЕХОДА
МЕЖАУ...

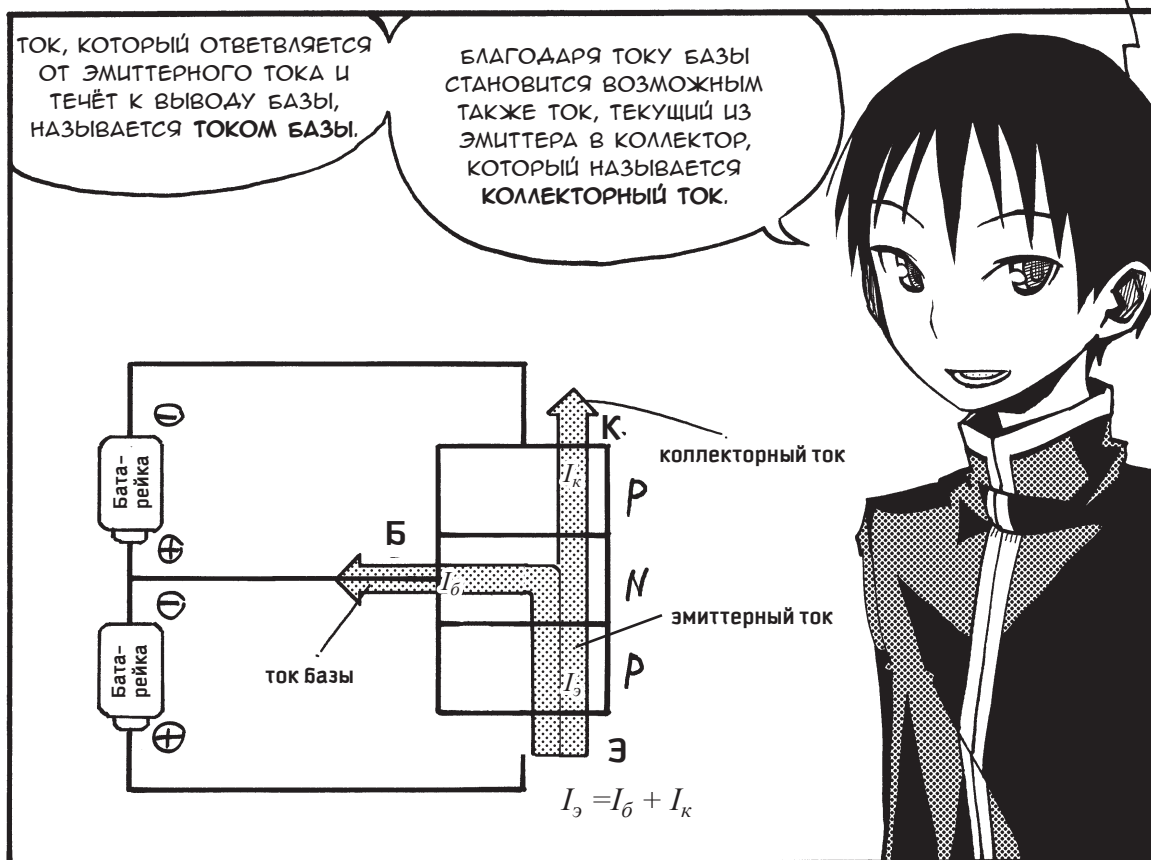
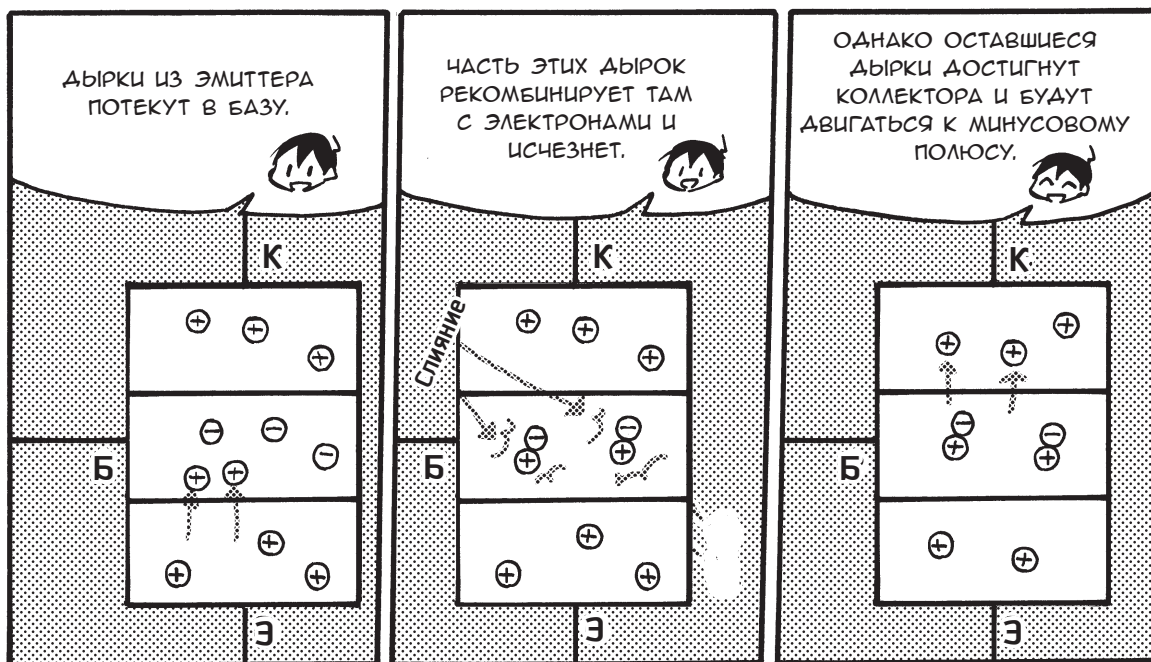
...БАЗОЙ И
КОЛЛЕКТОРОМ (ТО
ЕСТЬ В КОЛЛЕКТОРНОМ
ПЕРЕХОДЕ) СОВСЕМ
НЕ ОСТАНЕТСЯ НИ
ЭЛЕКТРОНОВ, НИ
ДЫРОК.



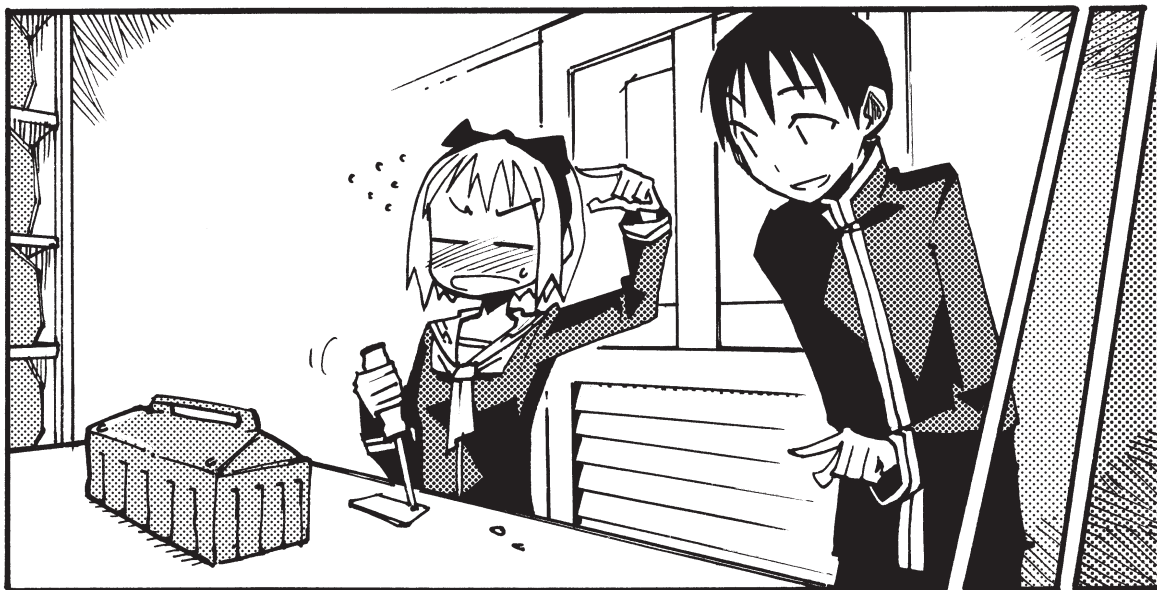
ПОЭТОМУ ТОК
ТЕЧЬ НЕ БУДЕТ.

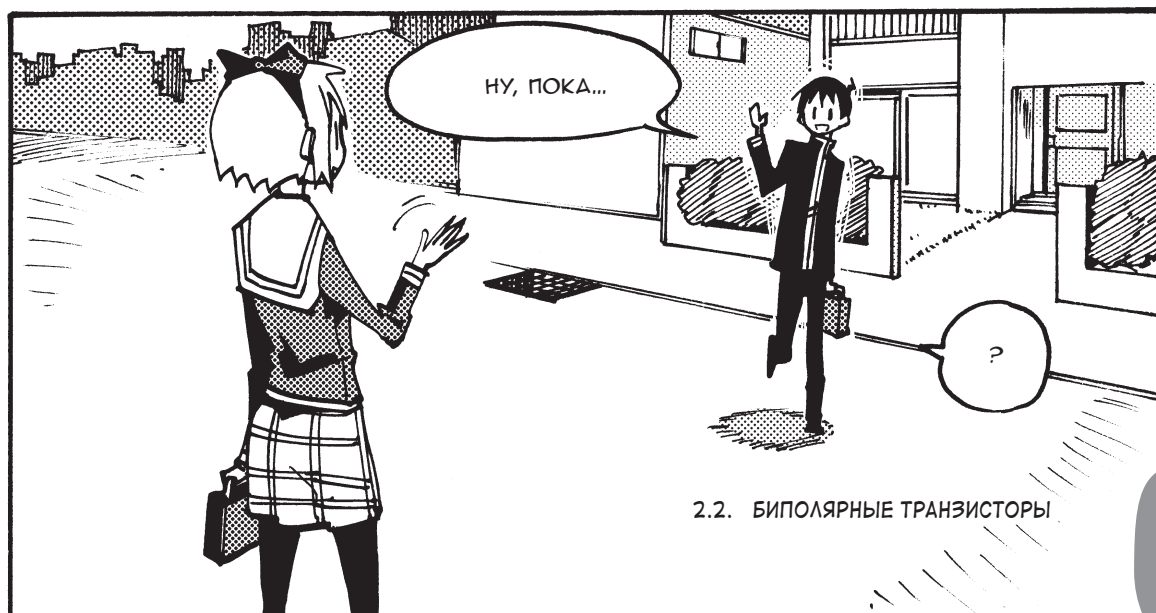
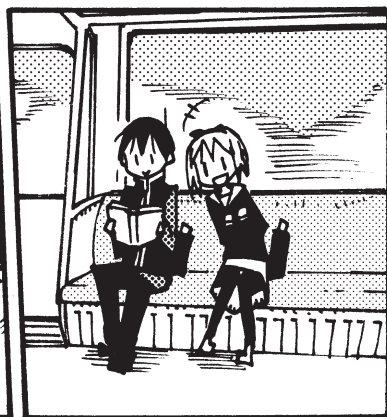
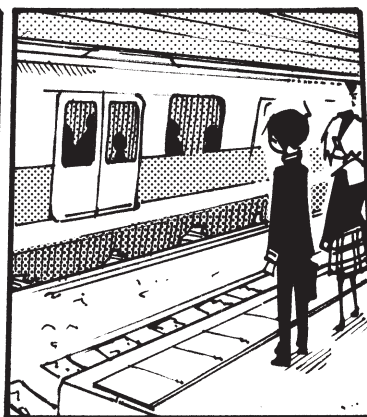
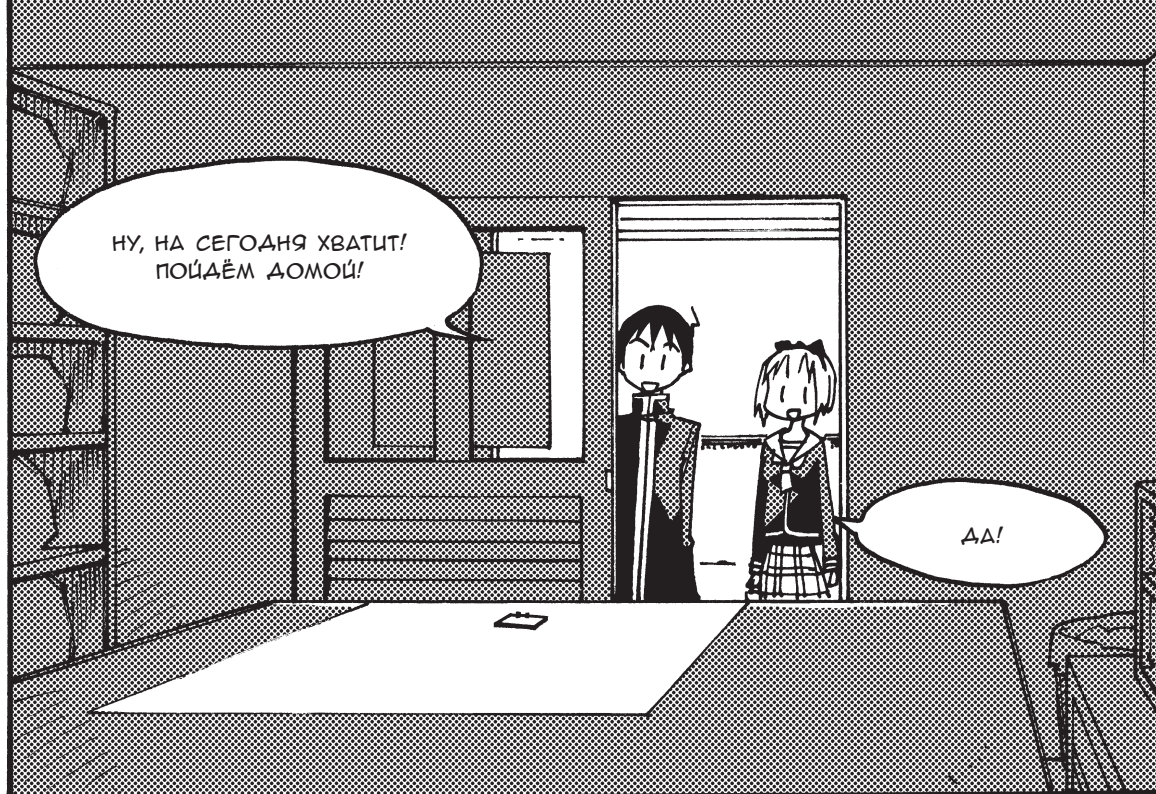




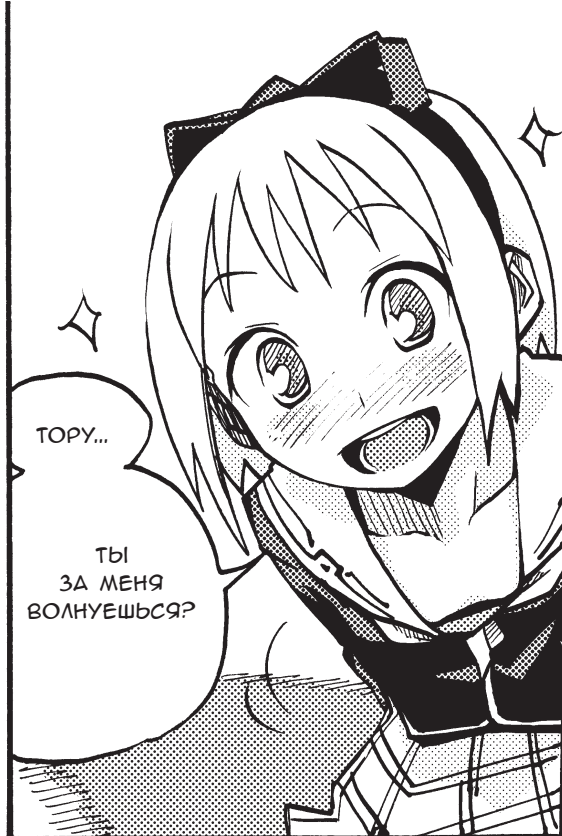












ТОРУ...

ТЫ
ЗА МЕНЯ
ВОЛНУЕШЬСЯ?



НУ, КАК
СКАЗАТЬ...

ОН ДОБРЫЙ!

♥ ♥ ♥



НЕ ХОЧУ ПРИЧИНЯТЬ ТЕБЕ БЕСПОКОЙСТВО,
И ПОЭТОМУ ВОЗВРАЩАЮСЬ.
ДО СВИДАНИЯ!!!



ХМ...
КАКАЯ СТРАННАЯ
ДЕВОЧКА...

Устройство и принцип работы ПТУП (J-FET)

ПТУП расшифровывается как полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (от англ. Junction Field Effect Transistor, J-FET). Его устройство показано на рис. 2-А1. В его основе находится тонкий слой полупроводника n -типа с двумя выводами, которые называются **сток** (С) и **исток** (И). Этот слой называется n -каналом. Кроме того, к нему пристыкованы два полупроводника p -типа с общим выводом, который носит название **затвор** (З).

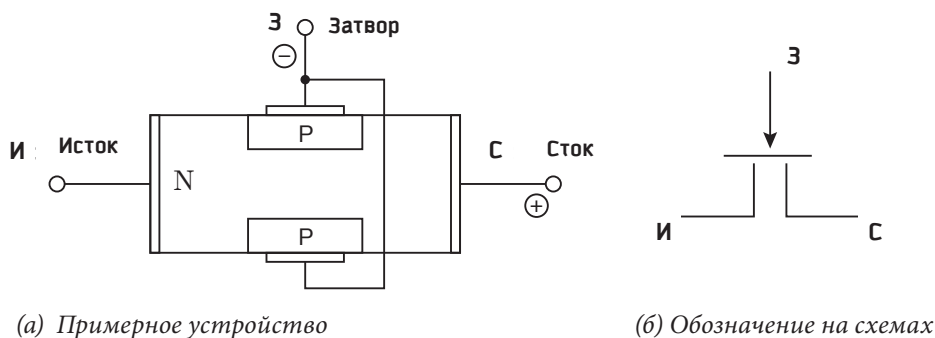


Рис. 2-А1 Устройство ПТУП

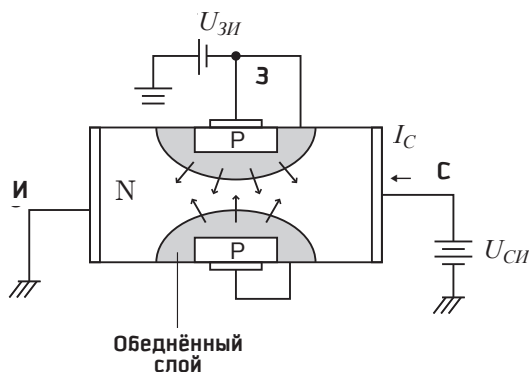


Рис. 2-А2 Принцип действия ПТУП

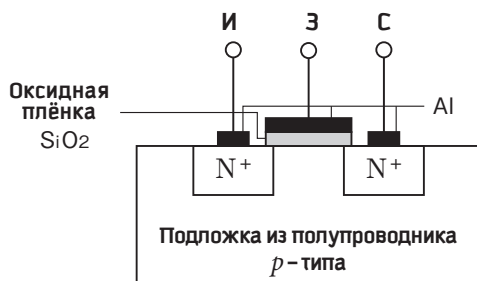
Принцип действия ПТУП показан на рис. 2-А2. Сначала мы прикладываем напряжение обратного смещения (напряжение, обеспечивающее работу транзистора) между затвором и истоком. Благодаря этому, в области перехода между полупроводником p -типа (затвор) и полупроводником n -типа (n -канал) формируется обеднённый слой. Ток, текущий от стока к истоку, то есть ток стока I_C , проходит через n -канал.

Кстати, если мы будем поддерживать $U_{СИ}$ на постоянном уровне, то чем больше будет $U_{ЗИ}$, тем шире будет обеднённый слой. А если этот слой расширится настолько, что перекроет n -канал, то ток стока I_C прекратится. Это значение напряжения $U_{ЗИ}$, при котором $I_C = 0$, называется **напряжением отсечки**, и управление $U_{ЗИ}$ осуществляется в диапазоне напряжений, которые по величине меньше, чем напряжение отсечки.

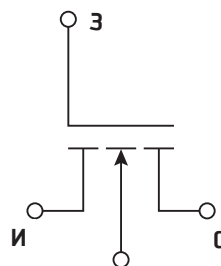
Важным свойством ПТУП является почти полное отсутствие тока, текущего через затвор, что позволяет управлять током стока с помощью напряжения затвора.

▶ ПТ МОП (MOS-FET)

ПТ МОП – это полевой транзистор со структурой металл-оксид-полупроводник (от англ. Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOS-FET), потому что он образован 3-мя слоями – металла, оксида и полупроводника. Устройство ПТ МОП показано на рис. 2-А3.



(а) Примерное устройство



(б) Обозначение на схемах

Рис. 2-А3 Устройство ПТ МОП

Таким образом, имеется подложка из полупроводника p -типа, а исток и сток представляют собой полупроводники n -типа с большим содержанием легирующей примеси, поэтому их обозначают n^+ . Кроме того, между контактом затвора и подложкой p -типа расположена оксидная плёнка (двуокись кремния – SiO_2).

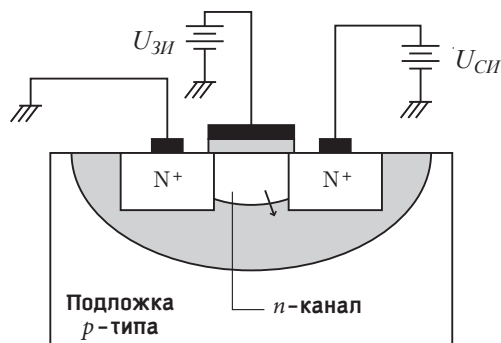


Рис. 2-А4 Принцип действия ПТ МОП

При отсутствии напряжения на затворе исток, подложка и сток образуют структуру *n-p-n*. Если при этом подключить источник питания «минусом» к истоку, а «плюсом» к стоку, ток не появится. Однако если на затвор подать напряжение смещения положительной полярности, то электрическое поле затвора, действуя через **оксидную плёнку** (обладает свойствами диэлектрика), сформирует тонкий слой с проводимостью *n*-типа в той части подложки *p*-типа, которая находится между истоком и стоком. Этот образовавшийся слой называется *n*-каналом, и когда он сформируется, от стока к истоку пойдёт ток.

ПТ МОП благодаря наличию под затвором **изолирующей плёнки** отличается почти полным отсутствием **тока затвора**, в чём аналогичен ПТУП. Благодаря этому, можно управлять током стока с помощью напряжения затвора.

▶ Отличия между биполярными и полевыми транзисторами

В биполярном транзисторе в качестве основных носителей заряда выступают как электроны, так и дырки, то есть в нём используются два основных вида носителей заряда. Именно поэтому его называют «биполярным» («би-» указывает на «два»). Однако полевые транзисторы, как ПТУП, так и ПТ МОП, имеют только один вид основных носителей заряда, поэтому их также называют **униполярными транзисторами** («уни-» указывает на «один»).

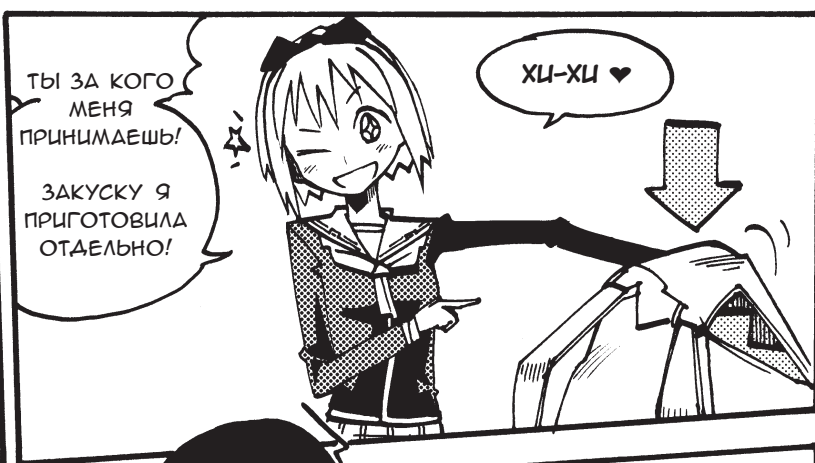
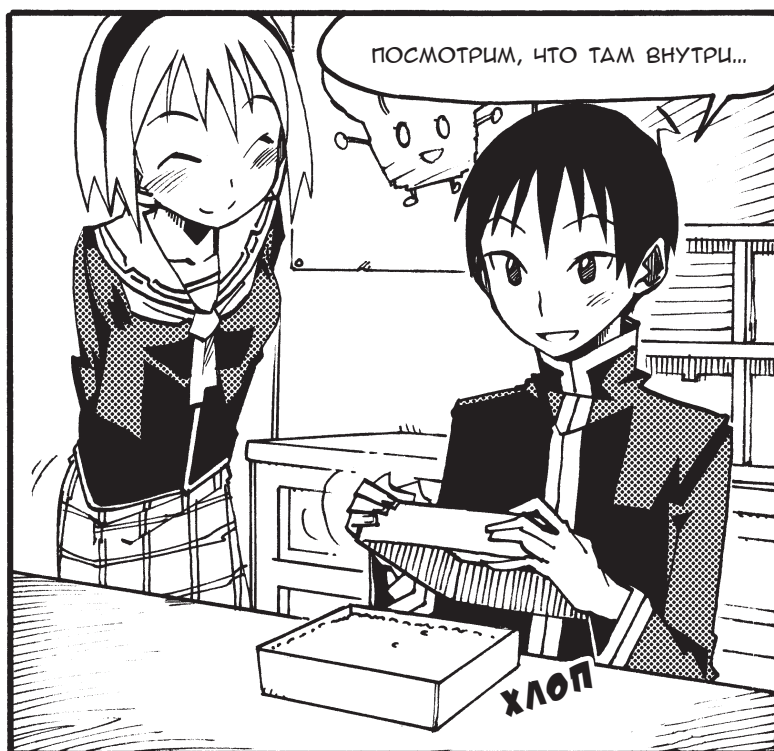
Кроме того, биполярный транзистор – это **элемент, управляемый током**, так как в нём с помощью тока базы управляют коллекторным током. В противоположность этому, униполярные транзисторы – это **элементы, управляемые напряжением**, так как в них током стока управляют с помощью **напряжения затвора**.

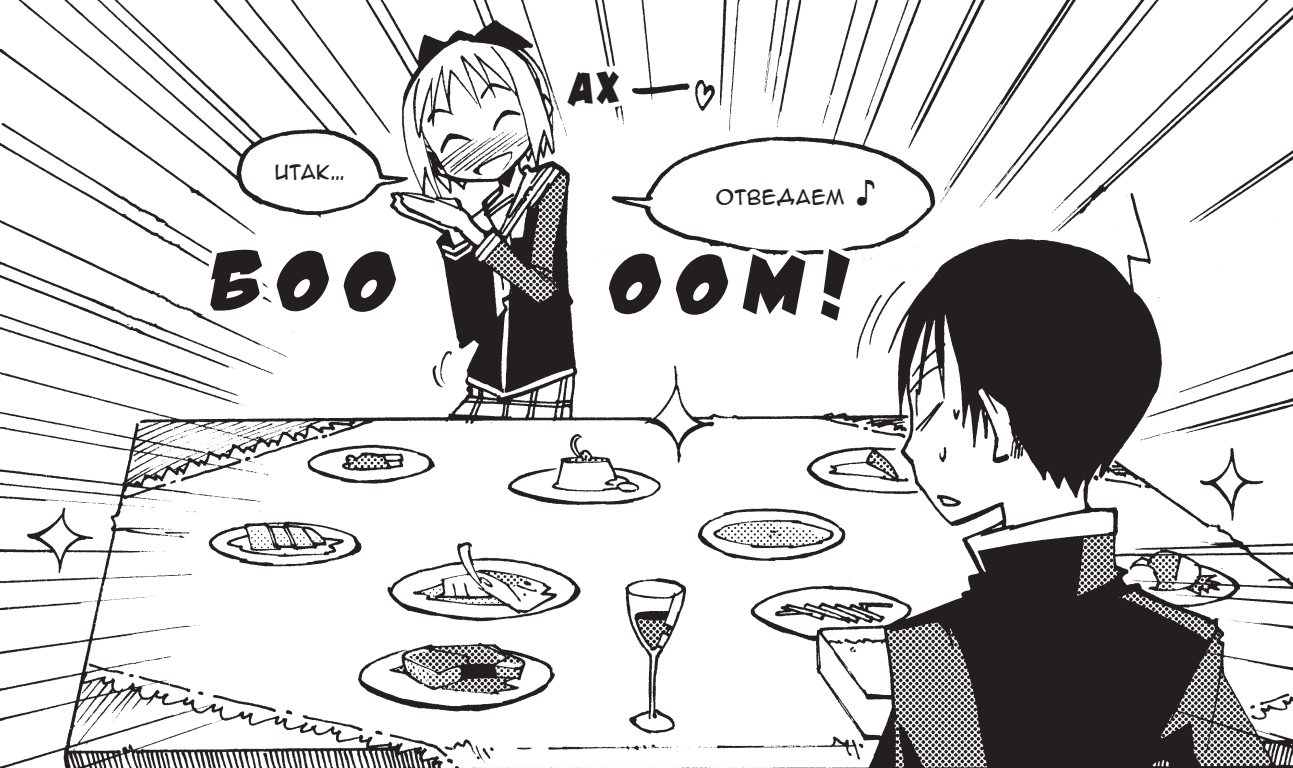
3 ГЛАВА

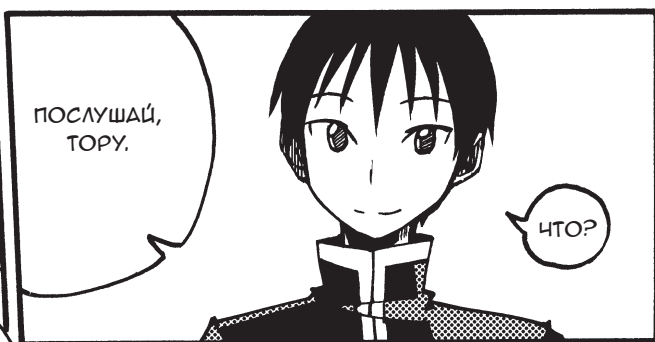
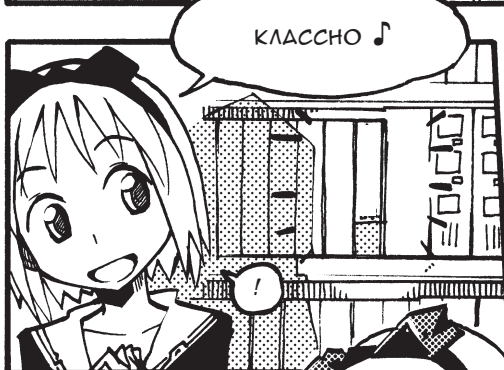
СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ











3.1. ПРАВИЛА КИРХГОФА

<Анализ цепей>

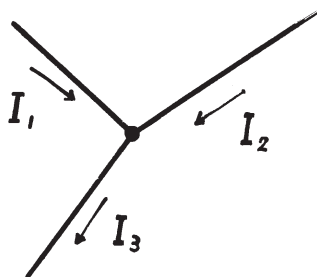


<Первое и второе правила Кирхгофа>

ПЕРВОЕ ПРАВИЛО
КИРХГОФА
ФОРМУЛИРУЕТСЯ ТАК:

СУММА ТОКОВ,
ВХОДЯЩИХ В ОДИН
УЗЕЛ, РАВНА НУЛЮ.

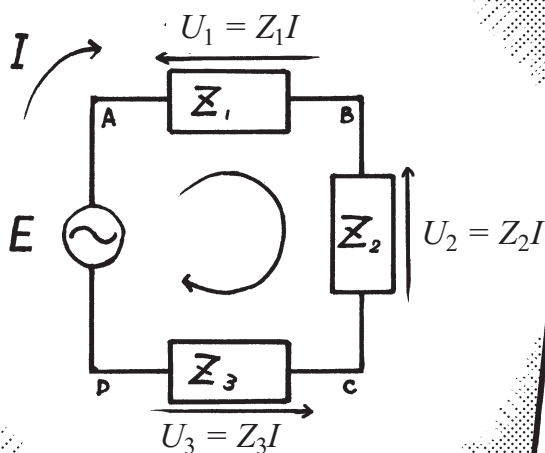
СОГЛАСНО ЭТОМУ ПРАВИЛУ,
СУММА ТОКОВ I_1 и I_2 ,
ВХОДЯЩИХ В СРЕДНЮЮ
ТОЧКУ НА ЭТОЙ СХЕМЕ,
РАВНА ТОКУ I_3 , ВЫХОДЯЩЕМУ
ИЗ СРЕДНЕЙ ТОЧКИ.



ЭТО ЕЩЁ НАЗЫВАЮТ
ЗАКОНОМ
СОХРАНЕНИЯ ТОКА.



ТЕПЕРЬ ВЗГЛЯНЕМ НА ЭТУ СХЕМУ.



ОЙ, ЧТО ЭТО?

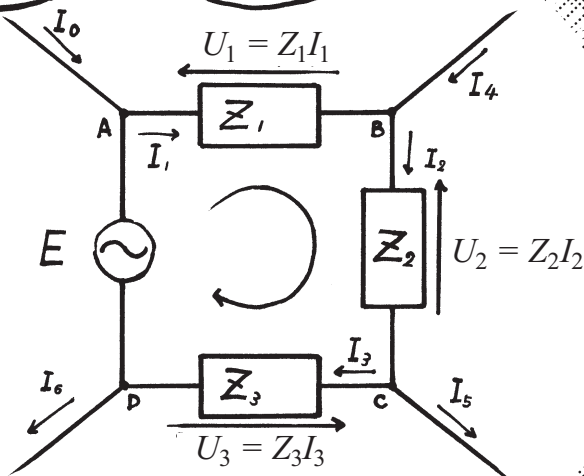
ЭТА СХЕМА
ИЛЛЮСТРИРУЕТ
ВТОРОЕ ПРАВИЛО
КИРХГОФА:

НАПРЯЖЕНИЕ E
КОТОРОЕ ЯВЛЯЕТСЯ
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ
СИЛОЙ (ЭДС), БУДЕТ
РАВНО СУММЕ ПАДЕНИЙ
НАПРЯЖЕНИЙ НА
НАГРУЗКАХ Z_1 , Z_2 и
 Z_3 , КОТОРЫЕ РАВНЫ
 $Z_1 \cdot I$, $Z_2 \cdot I$ и $Z_3 \cdot I$,
СООТВЕТСТВЕННО.

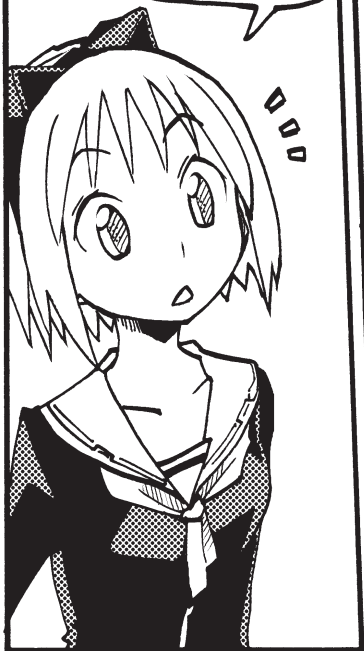


В КАЧЕСТВЕ ОБЩЕГО
СЛУЧАЯ РАССМОТРИМ
КОНТУР С УЗЛАМИ,
ИЗ КОТОРЫХ ИДУТ
ВЕТВИ.

ЧЕМ ЭТОТ КОНТУР
ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ
КОНТУРА НА
ПРЕДЫДУЩЕЙ
СТРАНИЦЕ?



В НЁМ ЕСТЬ УЗЛЫ
A, B, C и D, ИЗ
КОТОРЫХ ИДУТ ВЕТВИ...
И ТОКИ ЗАДЕСЬ
ДРУГИЕ.



АА, ПРАВИЛЬНО!

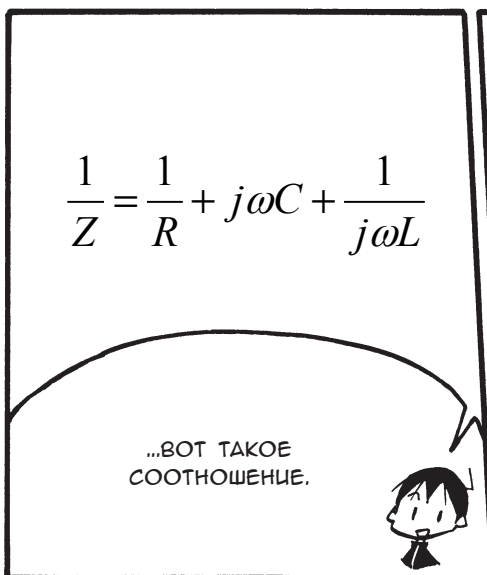
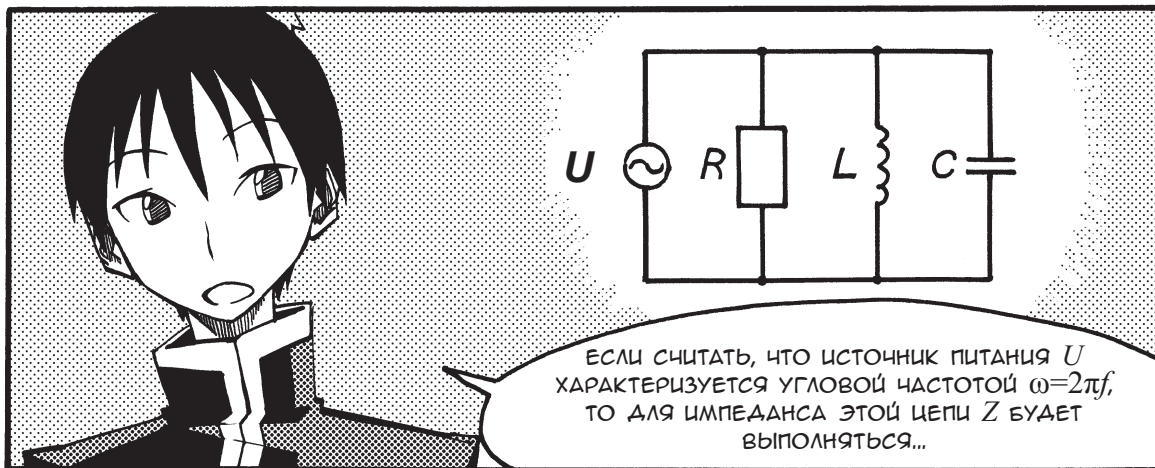
НО НЕСМОТРЯ НА ЭТО,
НАПРЯЖЕНИЕ E
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ
БУДЕТ ВСЁ ТАК ЖЕ РАВНО
СУММЕ ПАДЕНИЙ
НАПРЯЖЕНИЙ НА НАГРУЗКАХ
 Z_1 , Z_2 и Z_3 , КОТОРЫЕ
РАВНЫ $Z_1 \cdot I_1$, $Z_2 \cdot I_2$ и
 $Z_3 \cdot I_3$, СООТВЕТСТВЕННО.

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
«ВТОРОЕ ПРАВИЛО
КИРХГОФА».

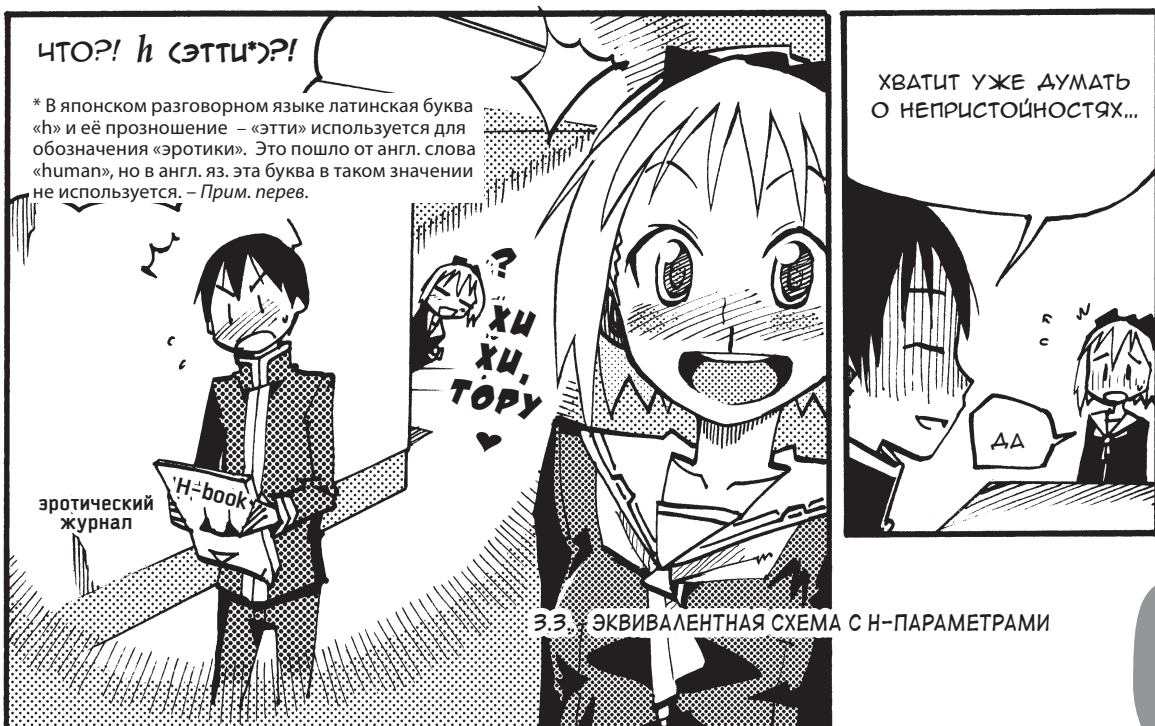
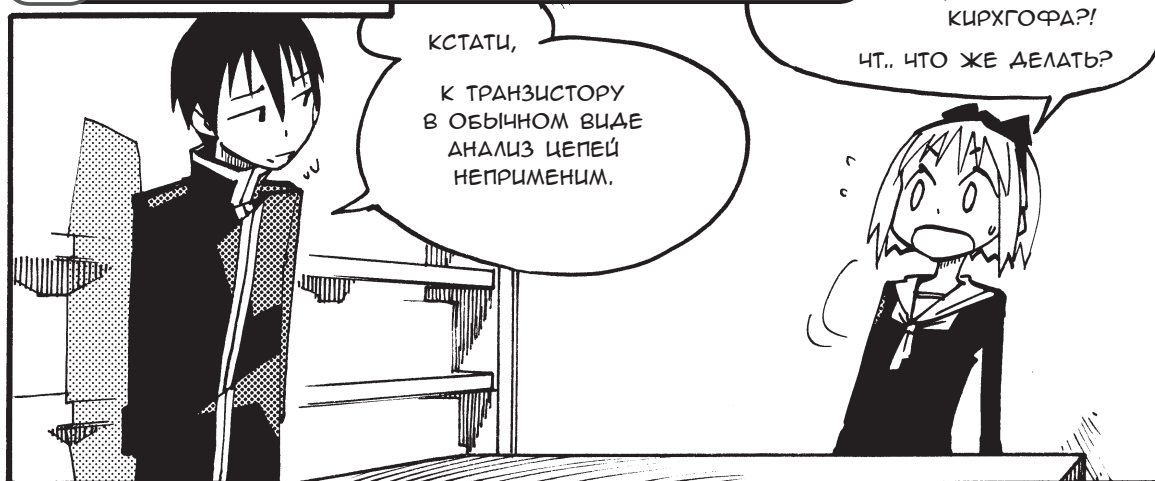


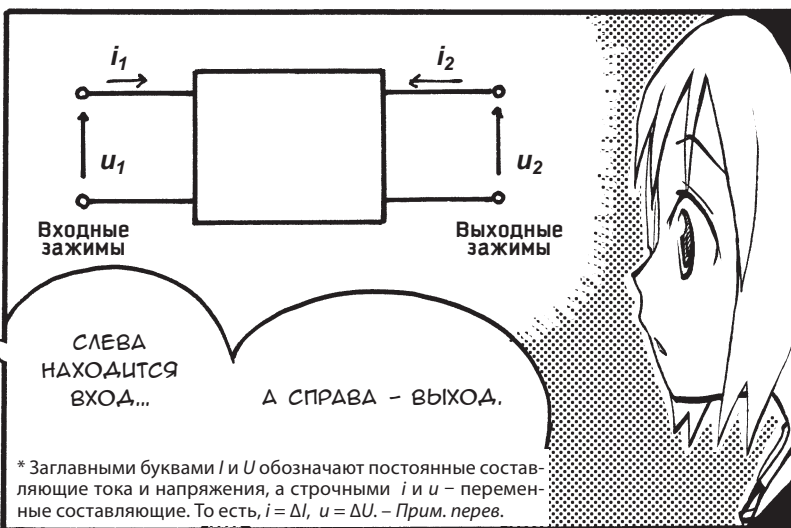
3.2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ RLC-ЦЕПИ





3.3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА С h -ПАРАМЕТРАМИ

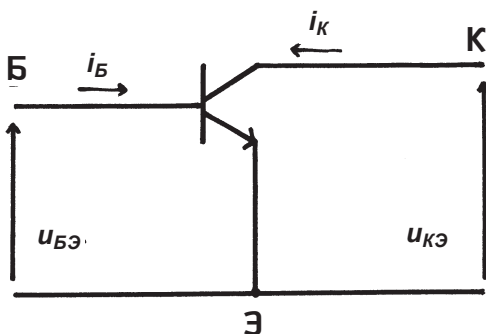




$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

МАТЕМАТИЧЕСКИ ЭТО ВЫРАЖАЕТСЯ ВОТ ЭТИМ МАТРИЦНЫМ УРАВНЕНИЕМ.

А ЕСЛИ ЭТУ ФОРМУЛУ ИЗООБРАЗИТЬ В ВИДЕ СХЕМЫ, МЫ ПОЛУЧИМ «ЭКВИВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ С h-ПАРАМЕТРАМИ». ЭТО, ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРА.



Транзистор, включённый по схеме с общим эмиттером (ОЭ)



А КАКОЙ СМЫСЛ ИМЕЮТ
ЧЕТЫРЕ БУКВЫ «h»
В ЭТОЙ ФОРМУЛЕ?

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

ХОРОШИЙ ВОПРОС.

У КАЖДОЙ ИЗ БУКВ «h» В ЭТОЙ
ФОРМУЛЕ ЕСТЬ СВОЙ, ОСОБЫЙ СМЫСЛ.

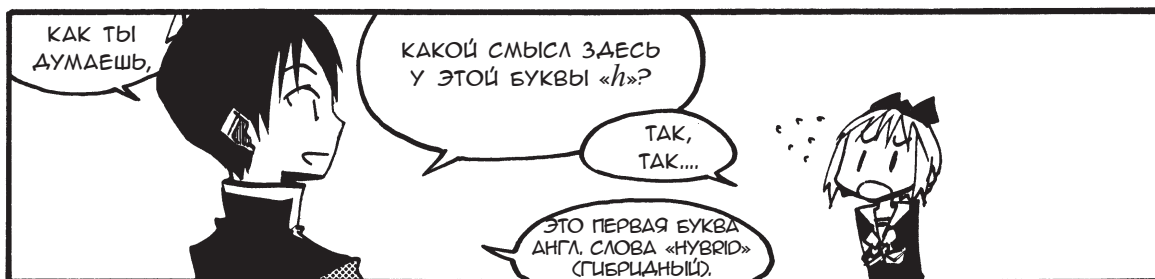
АА?

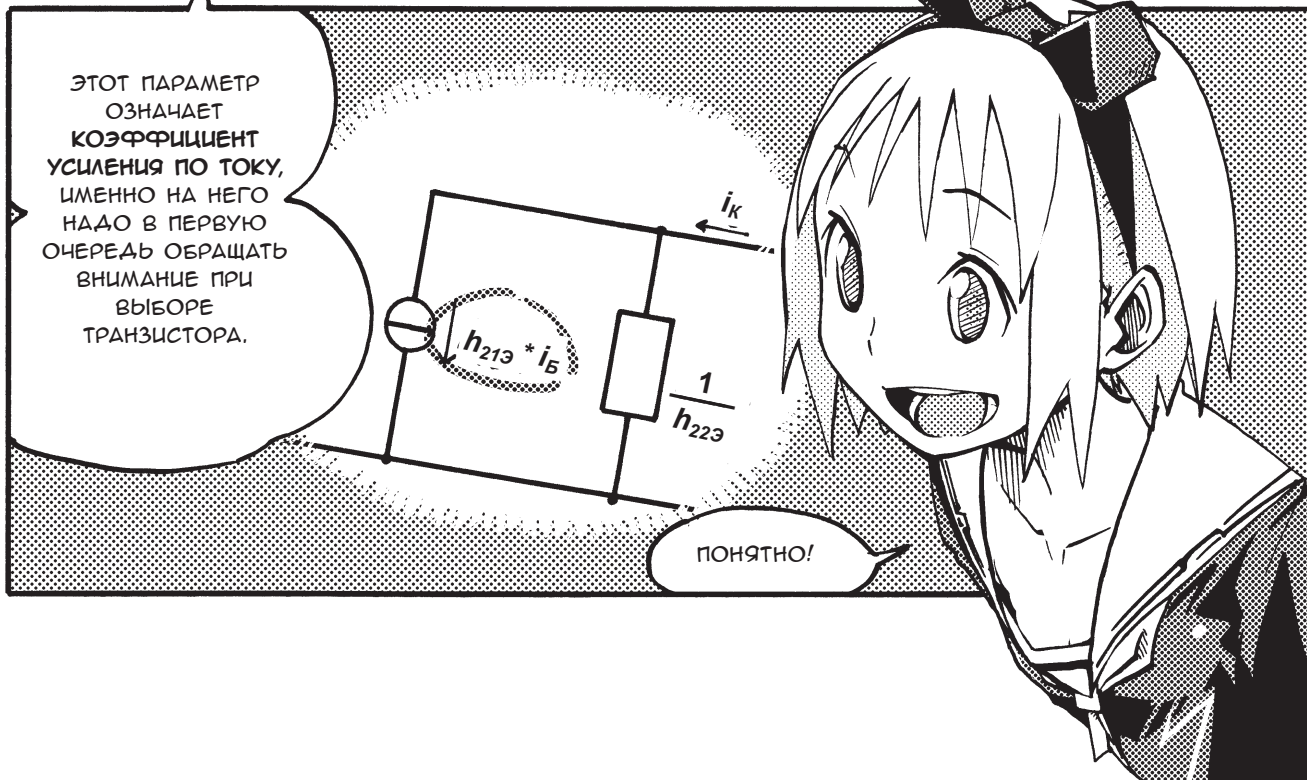
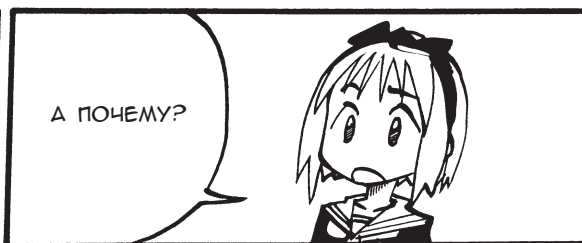
h_{11} – ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ЧИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_i ОТ АНГЛ. СЛОВА «INPUT» – ВХОД). ЭТО ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ИЗМЕРЕННОЕ СО СТОРОНЫ ВХОДНЫХ ЗАЖИМОВ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ НА ВЫХОДЕ ($u_2 = \Delta U_2 = 0$, Т. Е. $U_2 = const$).

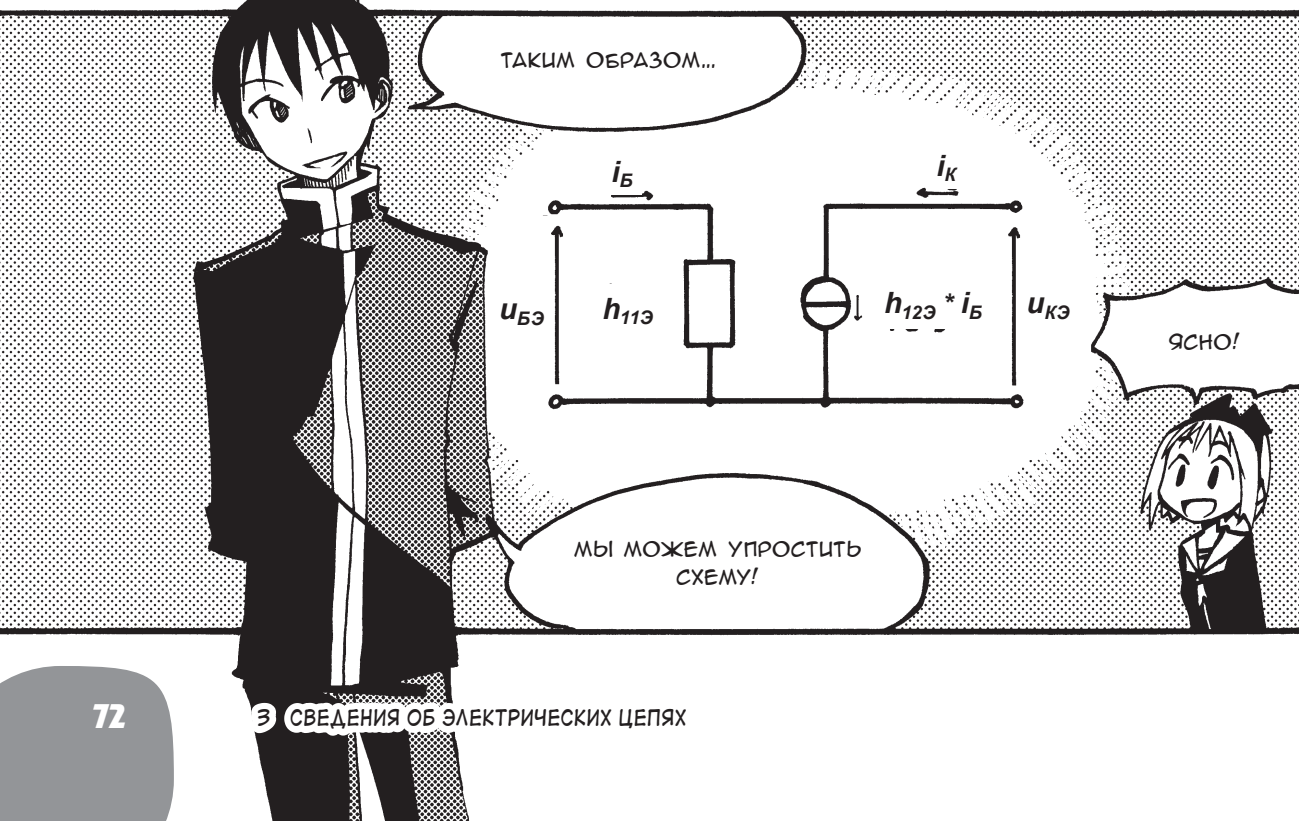
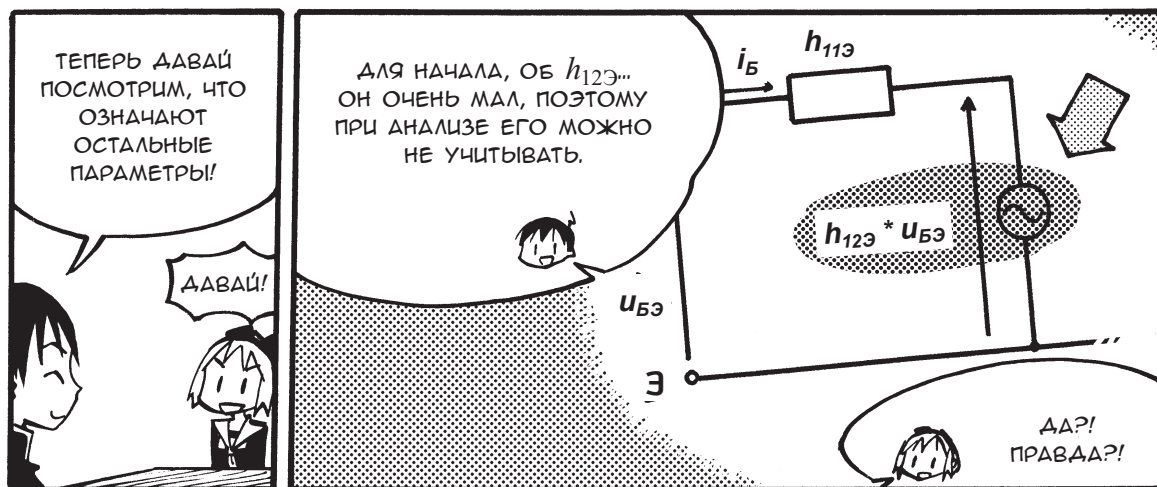
h_{12} – КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ЧИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_r ОТ АНГЛ. СЛОВА «REVERSE», УКАЗЫВАЮЩЕГО НА ОБРАТНУЮ ПЕРЕДАЧУ – ОТ ВЫХОДА К ВХОДУ). ЭТО ОТНОШЕНИЕ ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ К ВЫХОДНОМУ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ ХОЛОСТОГО ХОДА ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ НА ВХОДЕ ($i_1 = \Delta I_1 = 0$, Т. Е. $I_1 = const$).

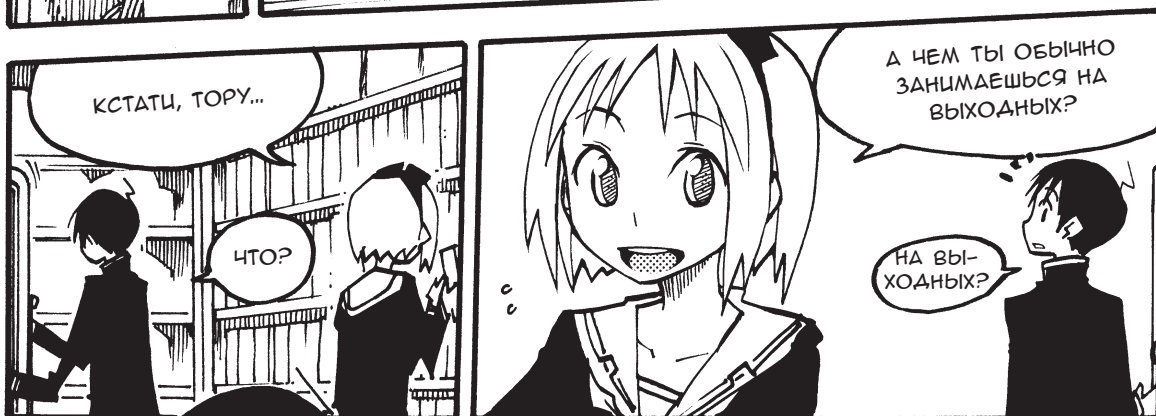
h_{21} – КОЭФФИЦИЕНТ ПРЯМОЙ ПЕРЕДАЧИ ТОКА (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ЧИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_f ОТ АНГЛ. СЛОВА «FORWARD», УКАЗЫВАЮЩЕГО НА ПРЯМУЮ ПЕРЕДАЧУ – ОТ ВХОДА К ВЫХОДУ). ЭТО ОТНОШЕНИЕ ВЫХОДНОГО ТОКА К ВХОДНОМУ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ НА ВЫХОДЕ ($u_2 = \Delta U_2 = 0$, Т. Е. $U_2 = const$).

h_{22} – ВЫХОДНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ЧИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_o ОТ АНГЛ. СЛОВА «OUTPUT» – ВЫХОД). ЭТО ВЕЛИЧИНА, ОБРАТНАЯ ПОЛНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ, ИЗМЕРЕННОМУ СО СТОРОНЫ ВЫХОДНЫХ ЗАЖИМОВ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ ХОЛОСТОГО ХОДА ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ НА ВХОДЕ ($i_1 = \Delta I_1 = 0$, Т. Е. $I_1 = const$).











ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источники напряжения и источники тока

Источники питания бывают двух типов – источники напряжения, вырабатывающие неизменное напряжение; и источники тока, вырабатывающие неизменный ток. На рис. 3-А1 показаны принятые обозначения источников питания: слева – источник напряжения постоянного тока, справа – источник напряжения переменного тока. Конечно, эта «неизменность» – понятие относительное, ведь как источники напряжения, так и источники тока обладают ненулевым конечным внутренним сопротивлением, которое не позволяет им отдавать бесконечно большую мощность в нагрузку.



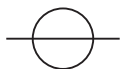
Источник напряжения постоянного тока



Источник напряжения переменного тока

Рис. 3-А1 Принятые обозначения источников питания

На рис. 3-А2 изображены идеальные источники питания. Если у идеального источника напряжения $u = 0$, то его можно считать закороченным (то есть заменённым перемычкой), а при $u \neq 0$ он выдаёт неизменное напряжение, не зависящее от величины нагрузки. Если у идеального источника тока $i = 0$, то соответствующую ветвь цепи можно считать разорванной, а при $i \neq 0$ он выдаёт неизменный ток, не зависящий от величины нагрузки. Нужно помнить, что идеальные источники питания не допускают эквивалентной замены. Другими словами, идеальный источник напряжения нельзя заменить на идеальный источник тока или наоборот. Подобная замена возможна только тогда, когда источники питания обладают ненулевым конечным внутренним сопротивлением.



Идеальный источник напряжения



Идеальный источник тока

Рис. 3-А2 Принятые обозначения идеальных источников питания

Что такое коэффициент передачи по напряжению

Коэффициент передачи по напряжению выражается через отношение **выходного напряжения** $u_{\text{вых}}$ к **входному напряжению** $u_{\text{вх}}$. Если это отношение больше 1, то говорят, что происходит **усиление**. Напротив, если оно меньше 1, то говорят об **ослаблении**.

На практике применяют две формы записи коэффициента передачи по напряжению.

$$A_u = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}}$$

$$A_u = 20 \log_{10} \left| \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} \right| [\text{дБ}]$$

Первая из них представляет собой обычное отношение, с помощью которого можно выразить также изменение фазы. Для нижней формы записи используется единица измерения, называемая **децибел** [дБ], которая используется не только в теории электронных схем, но также, например, в теории обработки сигналов. При использовании децибел в случае усиления получается положительное значение. Например, если уровень усиления равен 20 дБ, то понятно, что сигнал усиливается в 10 раз, но вот про изменение фазы ничего сказать нельзя.

► Коэффициент передачи тока

Коэффициент передачи тока выражается через отношение выходного тока $i_{\text{ВЫХ}}$ к входному току $i_{\text{ВХ}}$. В этом случае также существуют две формы записи:

$$A_{11} = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}}$$

$$A_{11} = 20 \log_{10} \left| \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}} \right| [\text{дБ}]$$

Частотой среза на **частотной характеристике** коэффициента передачи тока называют частоту, на которой $i_{\text{ВЫХ}} = \frac{i_{\text{ВХ}}}{\sqrt{2}}$.

При этом коэффициент передачи тока составит примерно 3 дБ.

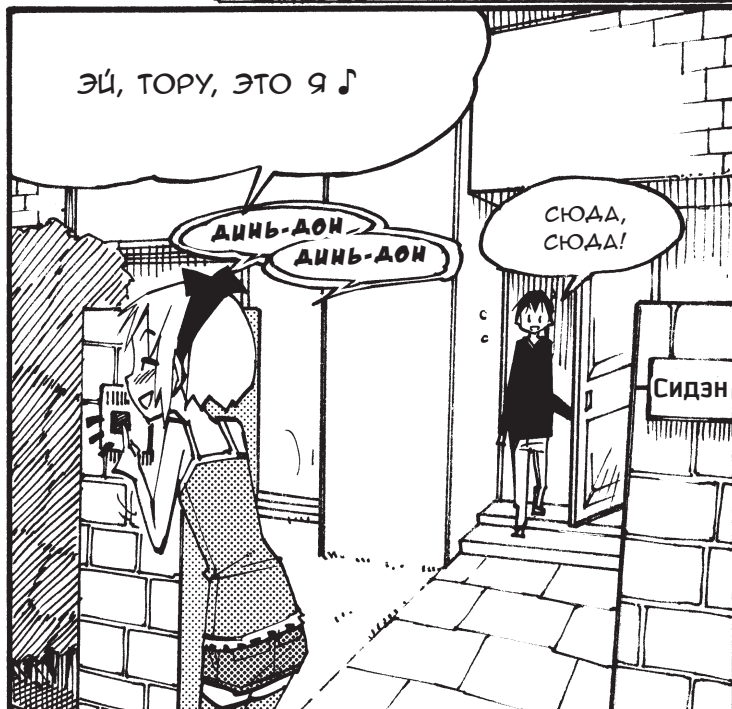
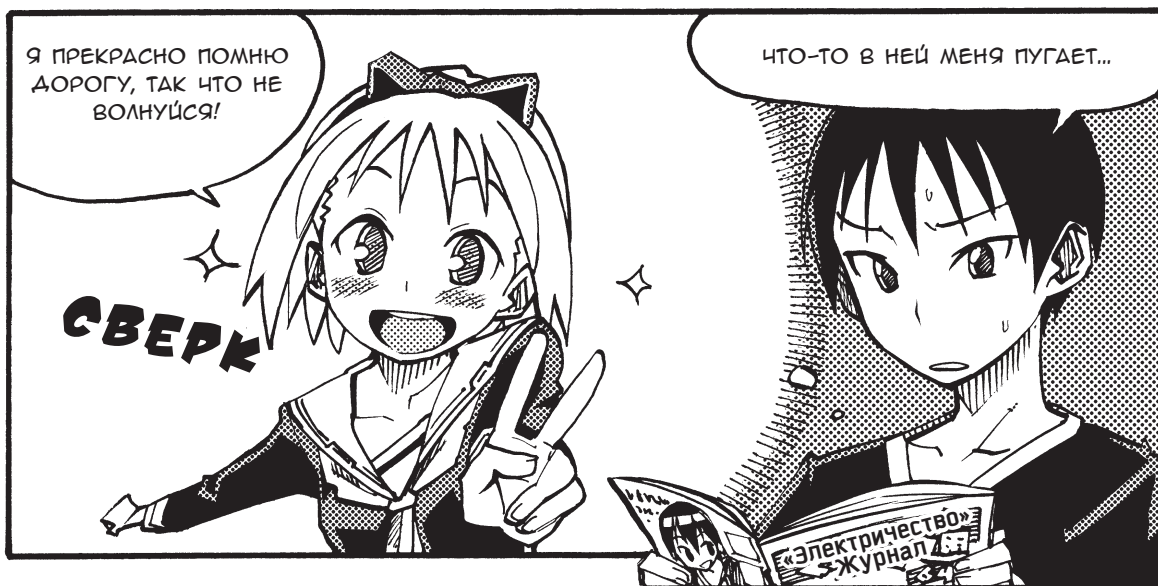
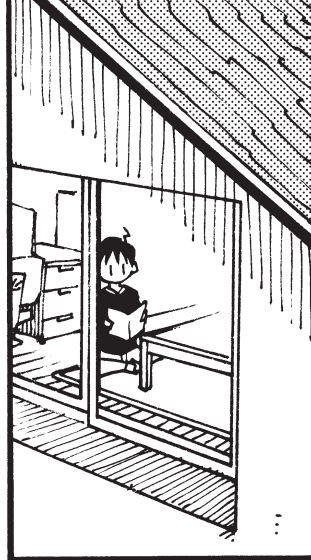
► Использование обозначений i и j в комплексных числах

При использовании комплексных чисел, например, в математике, используется соглашение $\sqrt{-1} = i$, однако в таких областях, как электротехника и электроника, для комплексных чисел используется $\sqrt{-1} = j$. Это позволяет избежать путаницы, так как буквой « i » принято обозначать ток. В этой книге, посвящённой электронным схемам, тоже используется соглашение $\sqrt{-1} = j$.

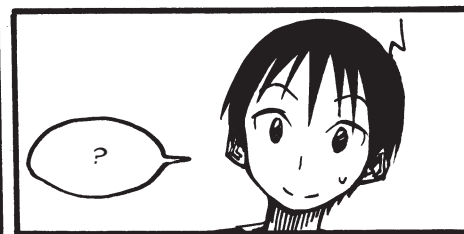
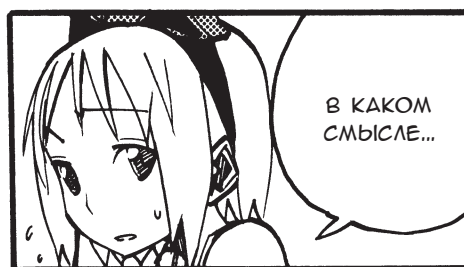
4
ГЛАВА

РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

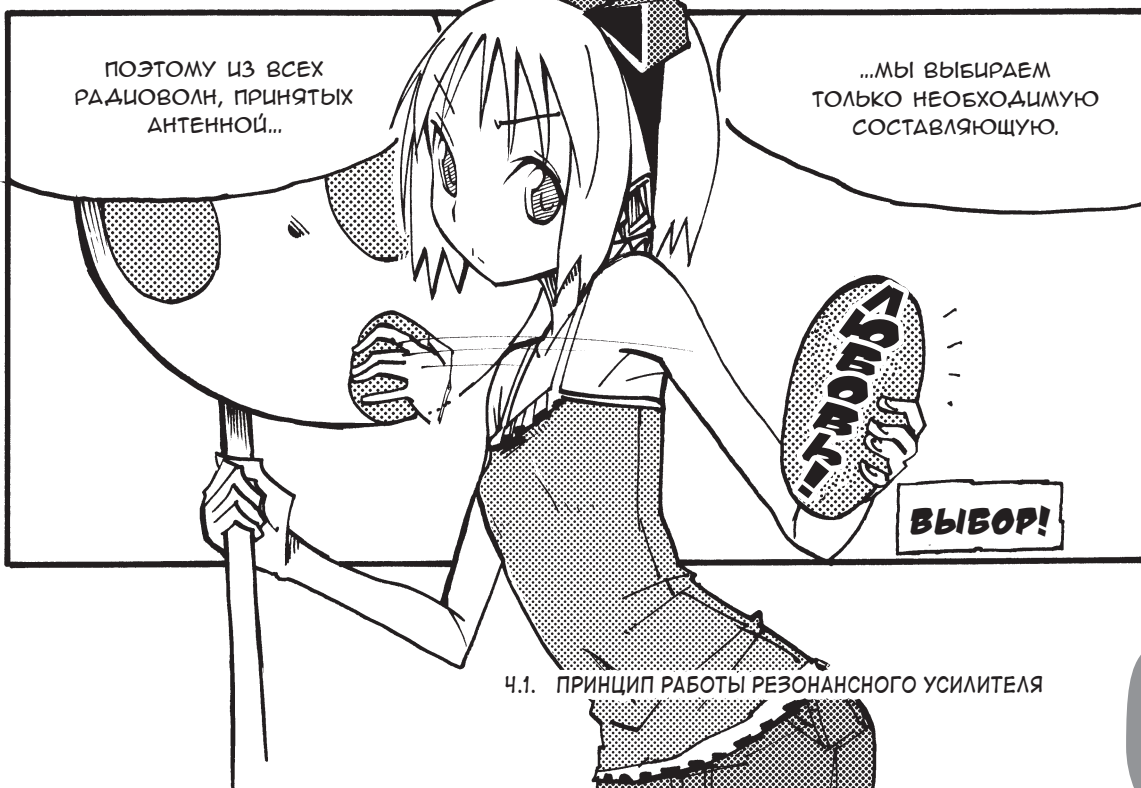


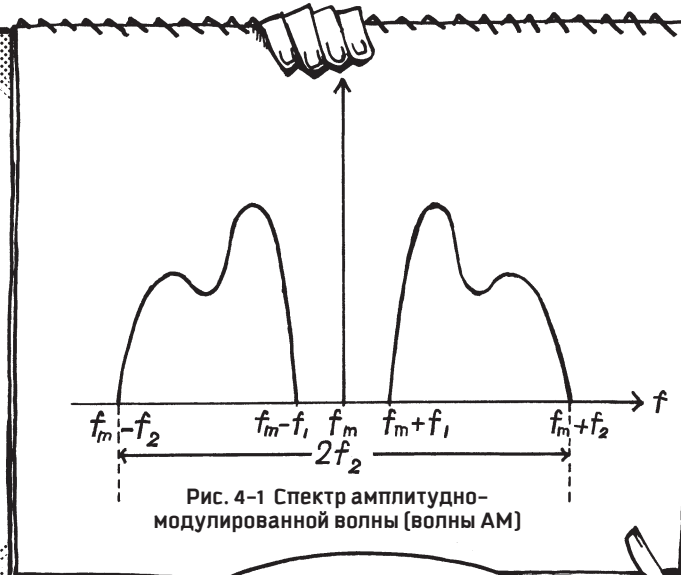
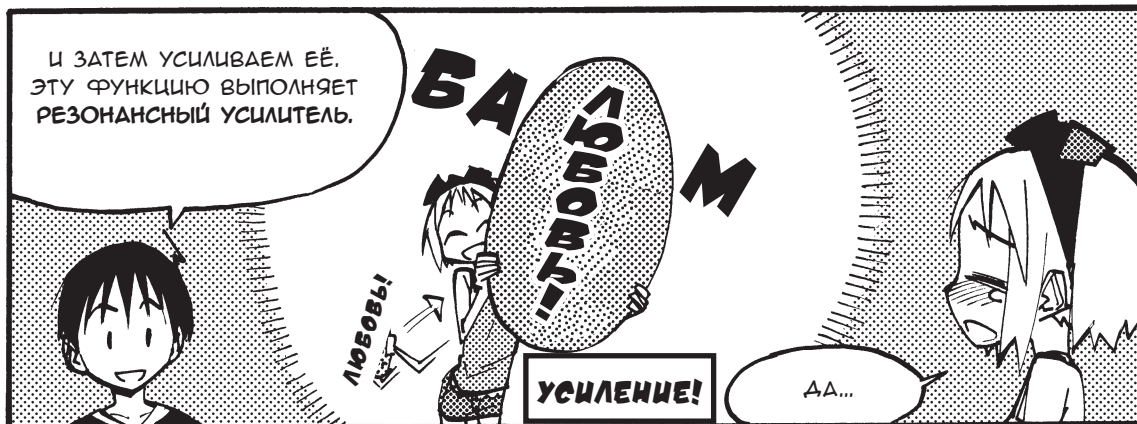






4.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

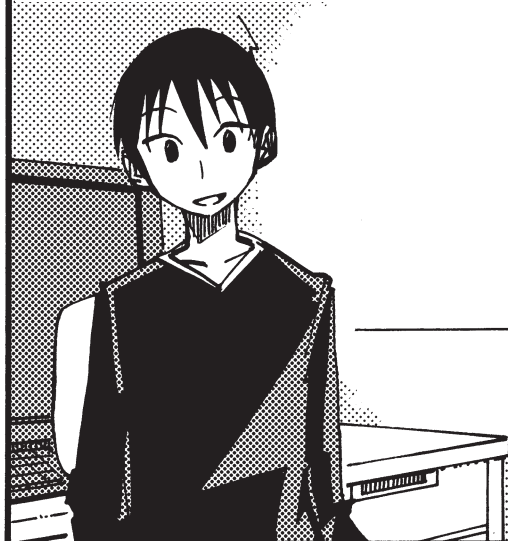




НА ЭТОМ РИСУНКЕ
ИЗОБРАЖЁН СПЕКТР
«АМПЛИТУДНО-
МОДУЛИРОВАННОЙ ВОЛНЫ».



<Что такое амплитудно-модулированная волна>



АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННАЯ ВОЛНА - ЭТО ТО, ЧТО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ В АМ-РАДИОВЕЩАНИИ.

ОНА СОСТОИТ ИЗ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ f_m , КОТОРАЯ НАХОДИТСЯ ПОСЕРЕДИНЕ, И ДВУХ РАСПОЛОЖЕННЫХ ПО БОКАМ ОТ НЕЁ ЗВУКОВЫХ СПЕКТРОВ.

f_m



НЕСУЩАЯ ЧАСТОТА - ЭТО ТА ЧАСТОТА, КОТОРАЯ НУЖНА ДЛЯ НАСТРОЙКИ НА РАДИОСТАНЦИЮ.

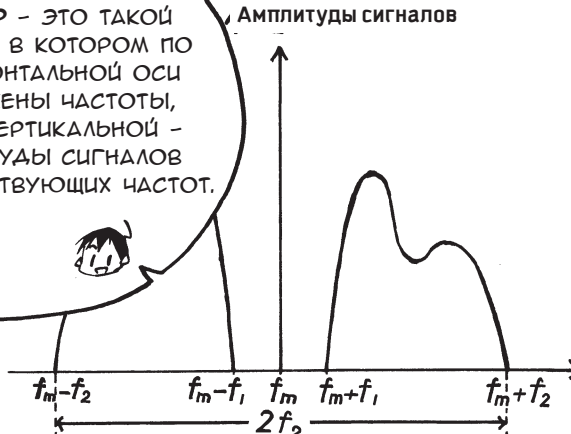
НАПРИМЕР, АМ-ПЕРЕДАЧИ РАДИОСТАНЦИИ «NHK RADIO 1» ПЕРЕДАЮТСЯ НА ЧАСТОТЕ 594 кГц.

ДА, АЕИСТВИТЕЛЬНО...

АДЛЕЕ,

СПЕКТР - ЭТО ТАКОЙ ГРАФИК, В КОТОРОМ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ ОТЛОЖЕНЫ ЧАСТОТЫ, А ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ - АМПЛИТУДЫ СИГНАЛОВ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЧАСТОТ.

Амплитуды сигналов

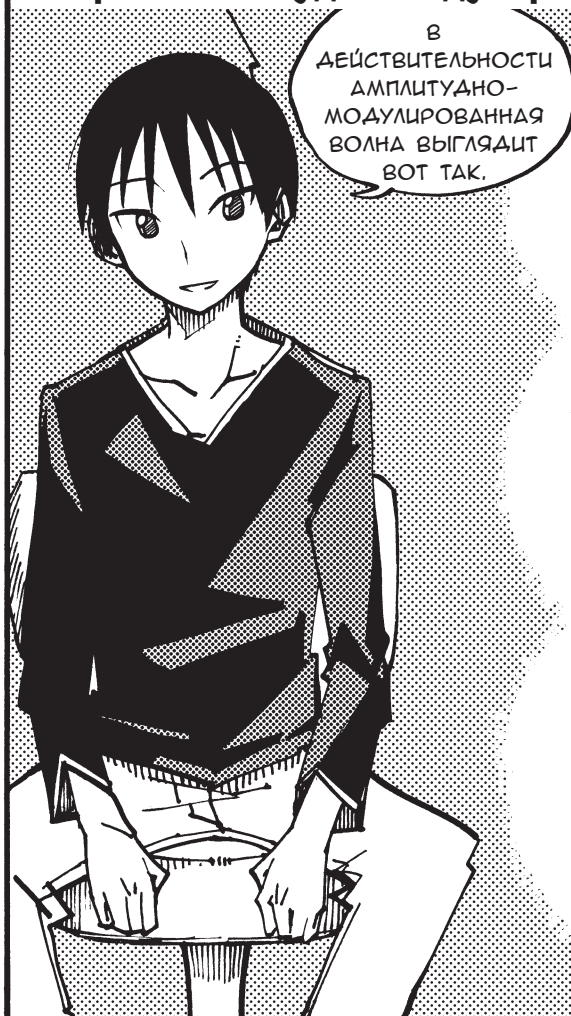


Частоты

$f_m - f_2$ $f_m - f_1$ f_m $f_m + f_1$ $f_m + f_2$

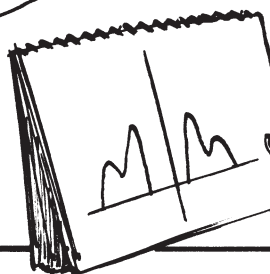
$2f_2$

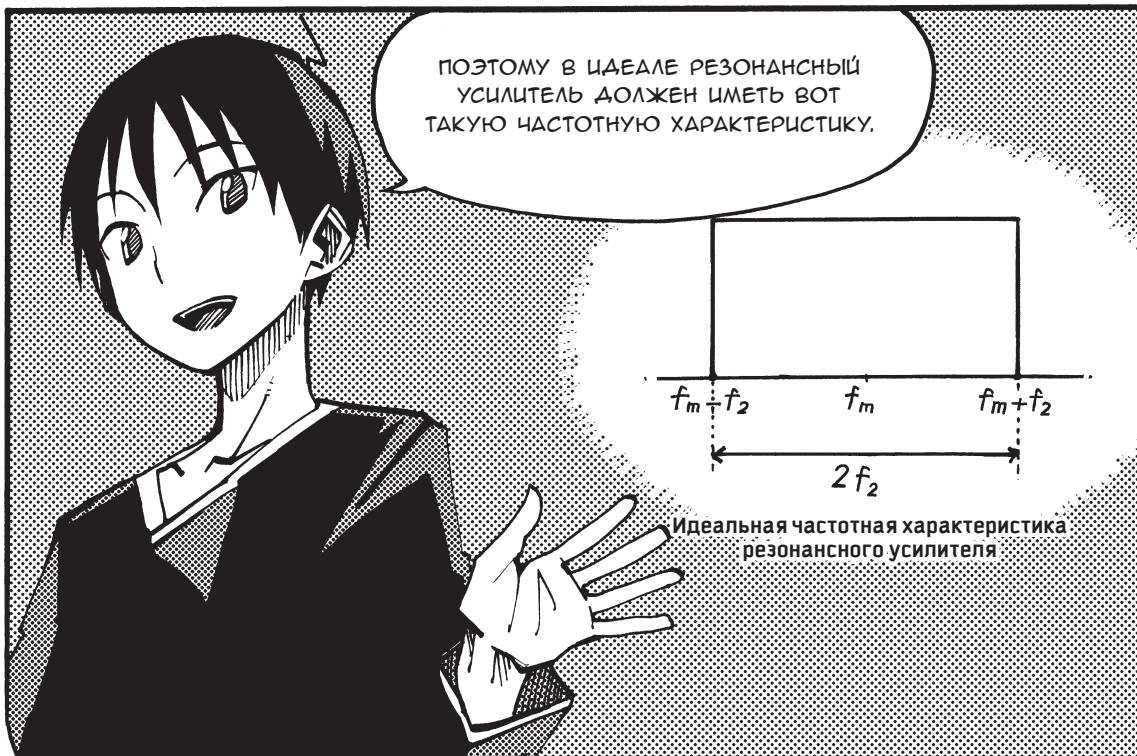
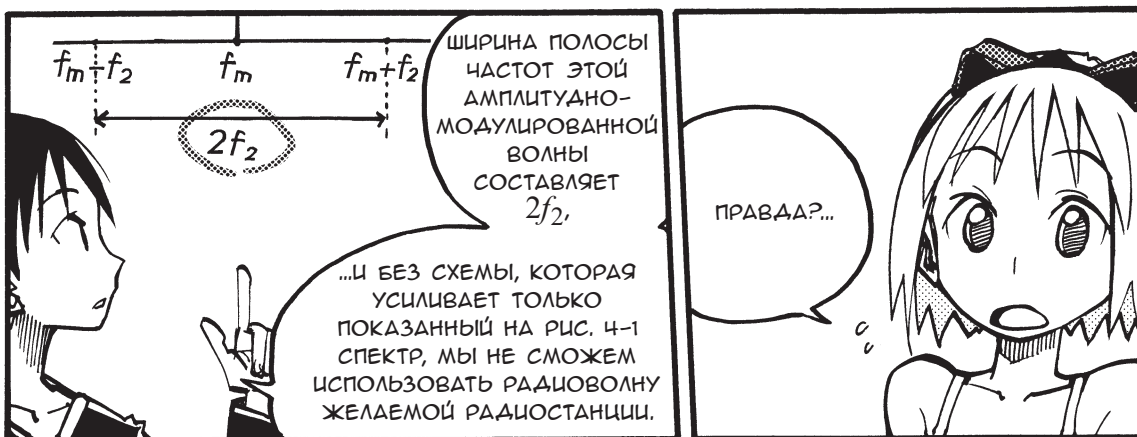
<Форма амплитудно-модулированной волны>

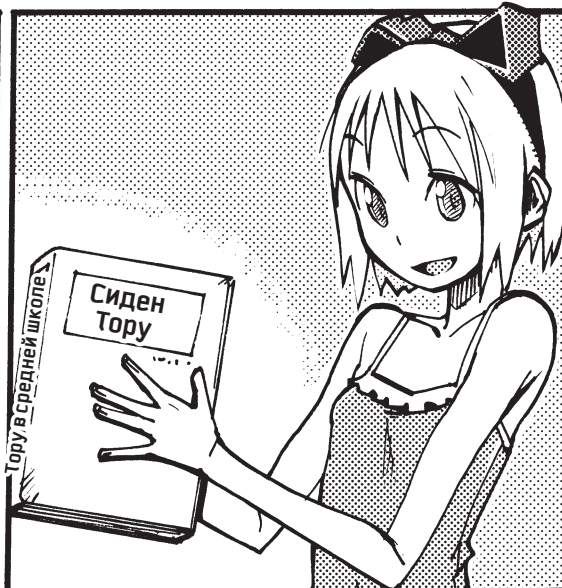
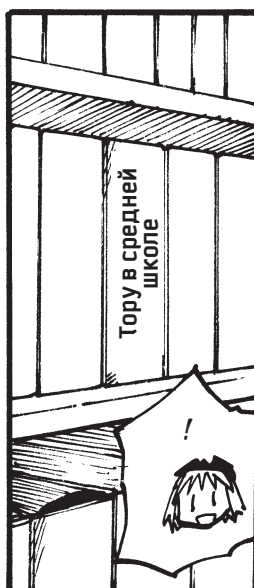
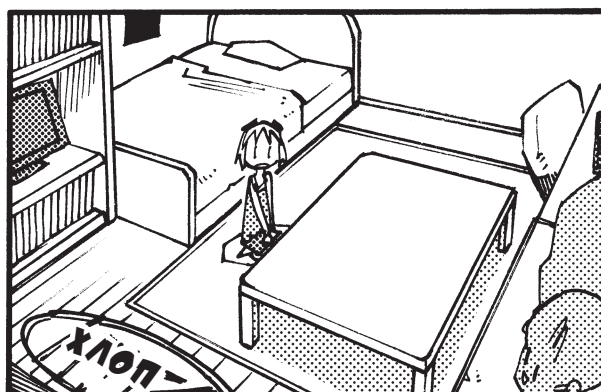


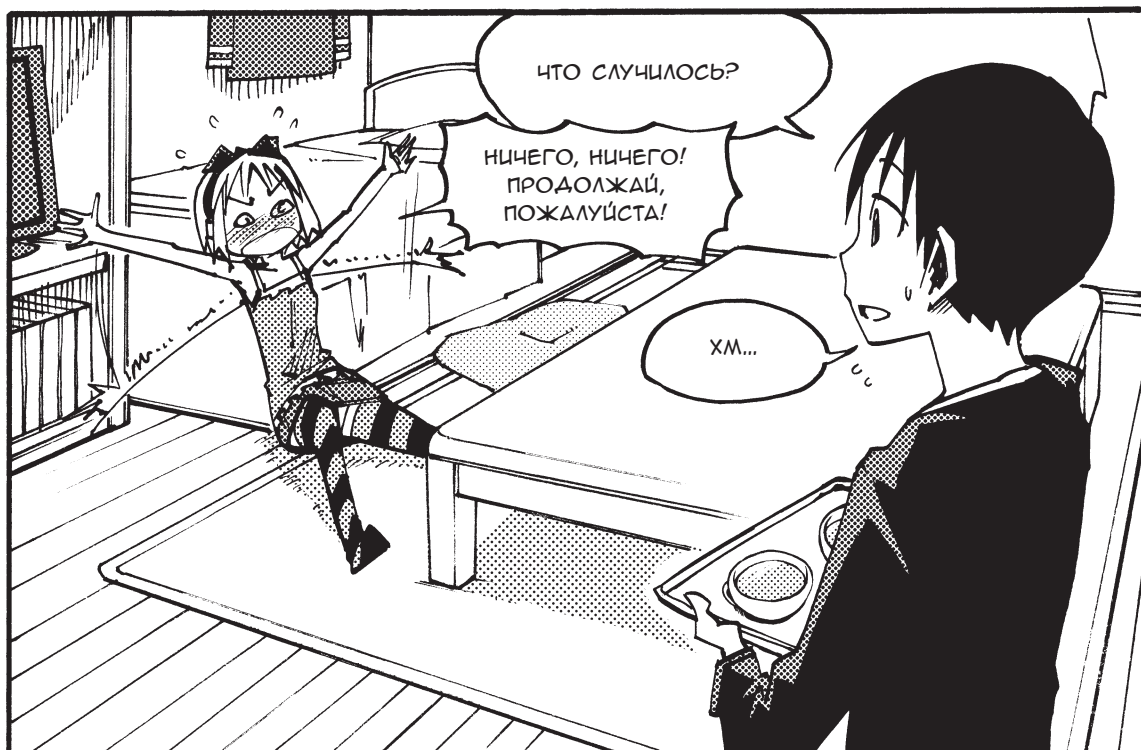
И СПЕКТР РАДИОВОЛНЫ
БУДЕТ ТАКИМ ЖЕ, КАК МЫ
ВИДЕЛИ НА РИС. 4-1.

АА-А?









4.2. ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



А... что это такое?

Похоже на схему подключения с общим эмиттером... это и есть резонансный усилитель?

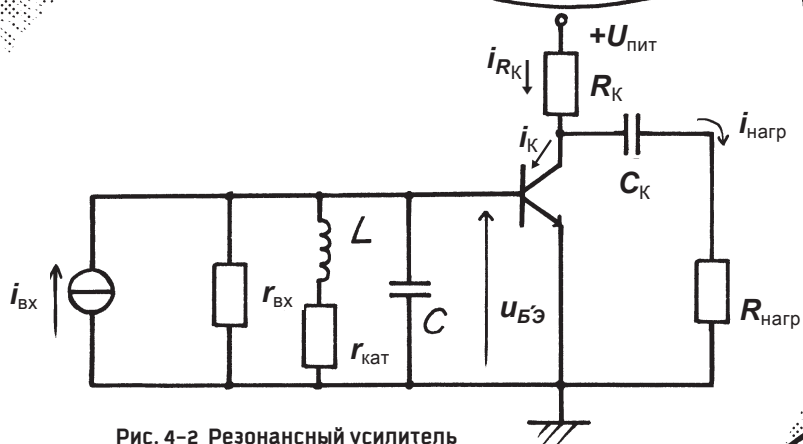
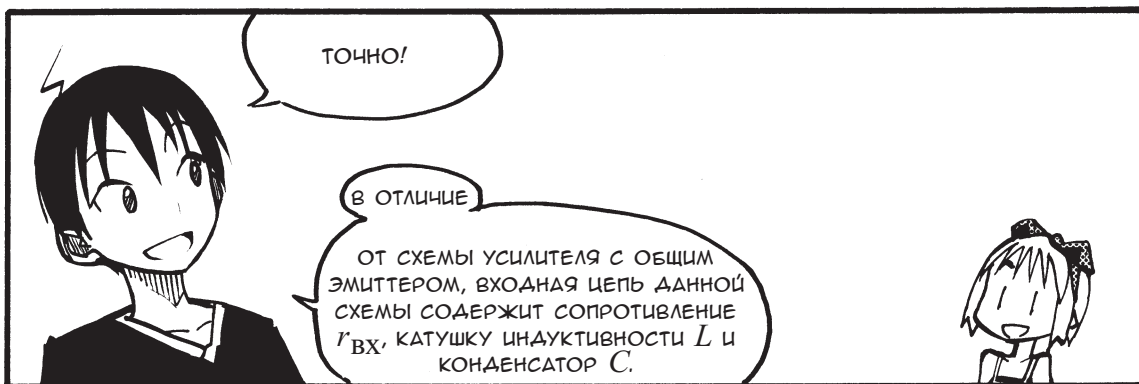
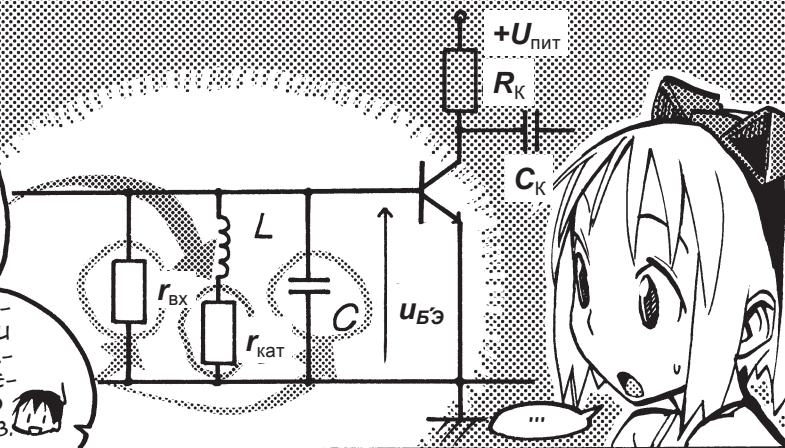


Рис. 4-2 Резонансный усилитель



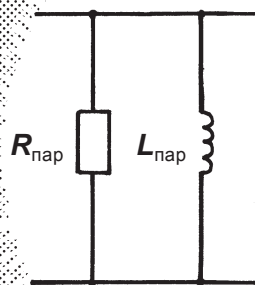
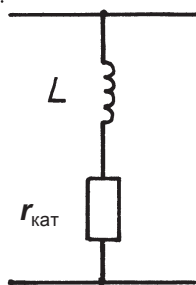
КРОМЕ ТОГО, СОПРОТИВЛЕНИЕ $r_{кат.}$ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В КАТУШКЕ ИНДУКТИВНОСТИ L .

ЗАМЕТИМ, ЧТО ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ $r_{вх.}$, КОНДЕНСАТОР C , ИНДУКТИВНОСТЬ L И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В КАТУШКЕ $r_{кат.}$ ОБРАЗУЮТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ЦЕПЬ, ЧТО УСЛОЖНЯЕТ АНАЛИЗ.



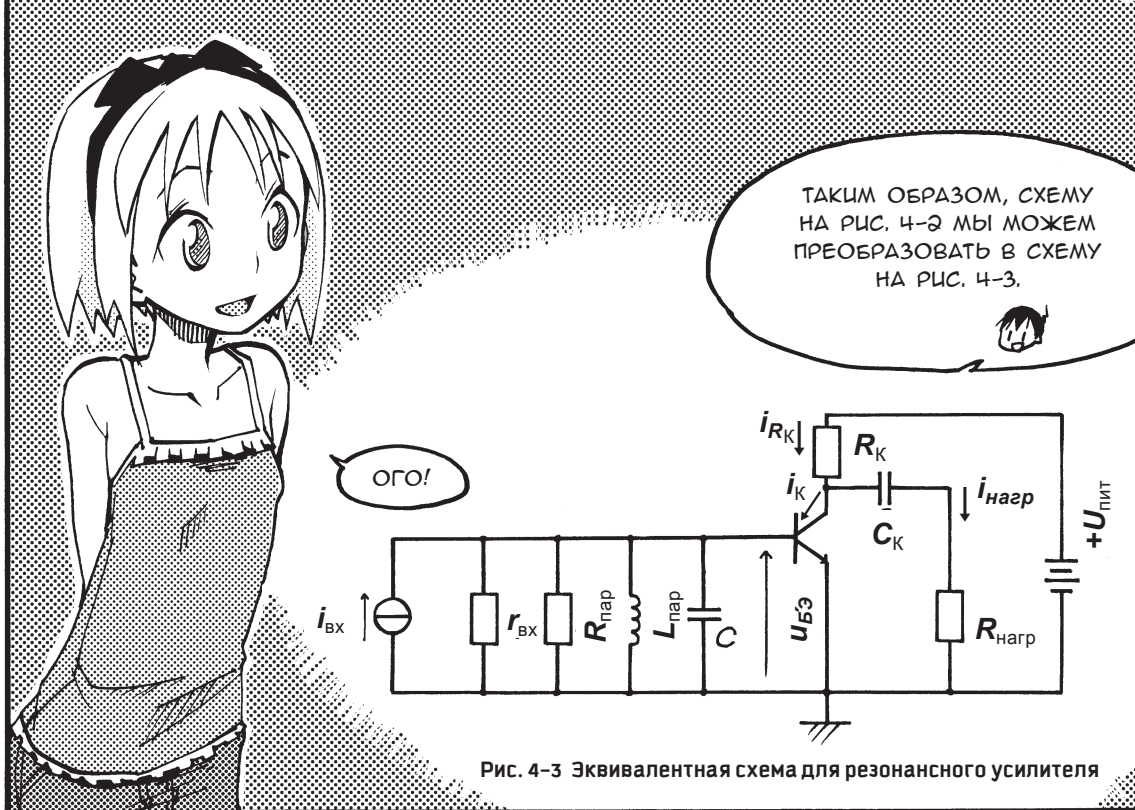
ПОЭТОМУ МЫ БЕРЁМ «ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ИМПЕДАНС, СОСТОЯЩИЙ ИЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ $r_{кат.}$ И ИНДУКТИВНОСТИ L »

И ПРЕОБРАЗУЕМ ЕГО В «ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ИМПЕДАНС, СОСТОЯЩИЙ ИЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ $R_{пар.}$ И ИНДУКТИВНОСТИ $L_{пар.}$ ».



А ЗАЧЕМ МЫ ЭТО ДЕЛАЕМ?

ПОТОМУ ЧТО ЭТО ПОЗВОЛИТ НАМ РАССМАТРИВАТЬ ВХОДНУЮ ЦЕПЬ КАК ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ЦЕПЬ, СОСТОЯЩУЮ ИЗ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ИНДУКТИВНОСТИ И ЁМКОСТИ!



ТАКИМ ОБРАЗОМ, СХЕМУ
НА РИС. 4-3 МОЖНО
ПРЕОБРАЗОВАТЬ
ВОТ ТАК!

ПОНЯТНО!
ЗАКОРОЧЕННЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ ИСЧЕЗЛИ!

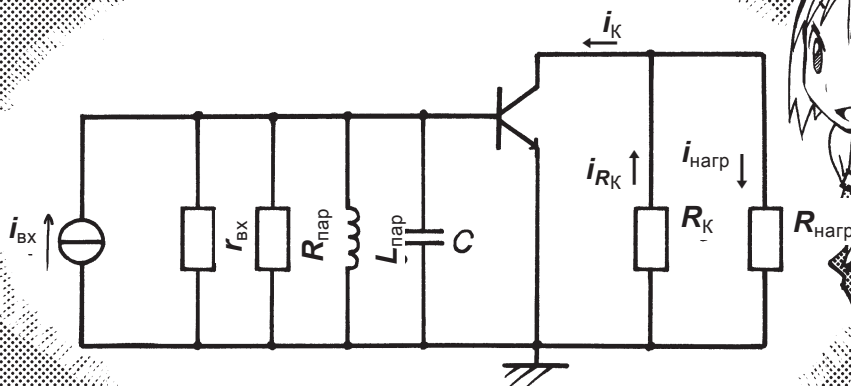


Рис. 4-4 Преобразование к эквивалентной схеме резонансного усилителя

«Эквивалентная схема для высоких частот»

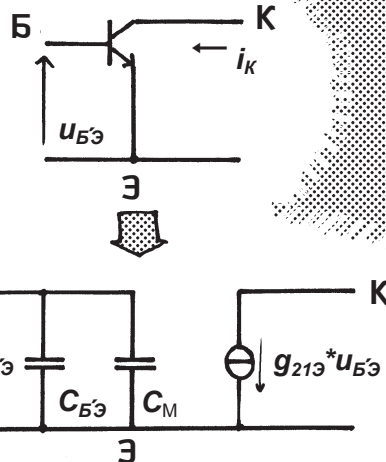
ДАЛЕЕ, И ЭТУ СХЕМУ
МЫ ПРЕОБРАЗУЕМ В
«ЭКВИВАЛЕНТНУЮ
СХЕМУ ДЛЯ ВЫСОКИХ
ЧАСТОТ».

ДЛЯ ВЫСОКИХ
ЧАСТОТ?

ЭТО ЧАСТОТЫ
ОБЫЧНЫХ
РАДИОВОЛН.
ТАКИЕ ЧАСТОТЫ
НЕЛЬЗЯ ПРЕВРАТИТЬ
В ЗВУКОВЫЕ
ВОЛНЫ, СЛЫШНЫЕ
НАШЕМУ УХУ.

ЯСНО!

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА
ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ
ВЫСОКИХ ЧАСТОТ
ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК.

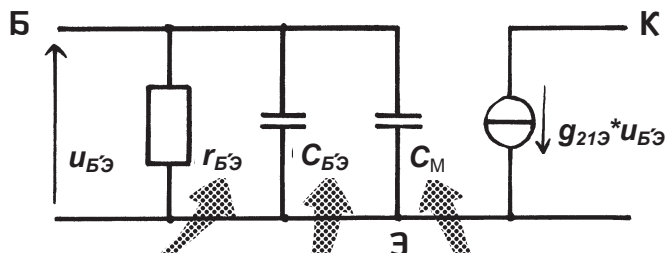


* «Б» здесь означает точку в середине самой базы транзистора, в то время «Б» без чёрточки означает вывод базы. – Прим. перев.

Рис. 4-5 Эквивалентная схема транзистора для высоких частот

<Паразитная ёмкость и эффект Миллера>

В ЭТОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЕ ДЛЯ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ, ТРИ ЭЛЕМЕНТА...



$r_{бэ}$ - СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭМИТТЕРНОГО ПЕРЕХОДА;

$C_{бэ}$ - ПАРАЗИТНАЯ ЁМКОСТЬ ЭМИТТЕРНОГО ПЕРЕХОДА НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ;

C_M - ПАРАЗИТНАЯ ЁМКОСТЬ ВЫЗВАННАЯ ЭФФЕКТОМ МИЛЛЕРА, ВОЗНИКАЮЩЕГО НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ИЗ-ЗА ПАРАЗИТНОЙ ЁМКОСТИ КОЛЛЕКТОРНОГО ПЕРЕХОДА.

ЭТИ ТРИ ЭЛЕМЕНТА ОБРАЗУЮТ ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ЦЕПЬ.

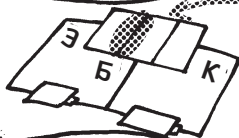
ТАК...

А ЧТО ТАКОЕ «ПАРАЗИТНАЯ ЁМКОСТЬ»?

НО ТОГДА МОЖНО ВЕДЬ ОБОЙТИСЬ ТОЛЬКО $C_{бэ}$...

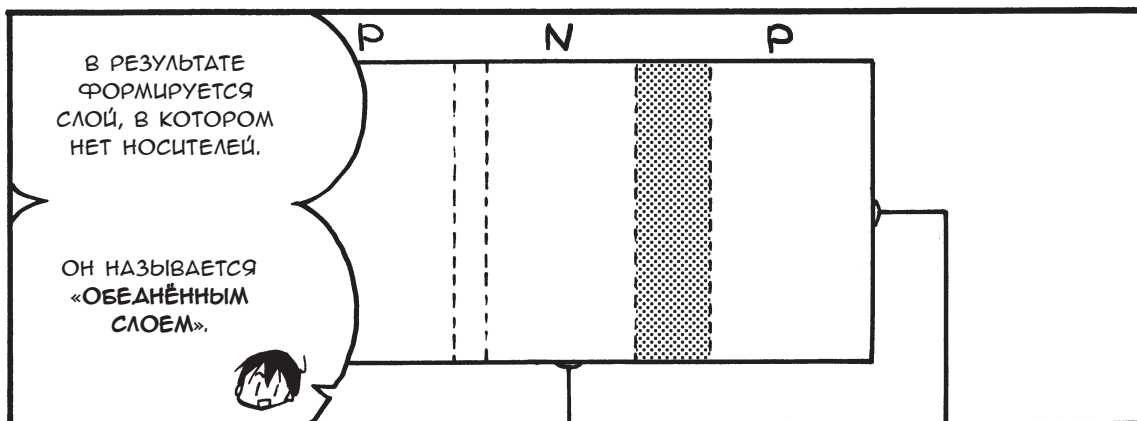
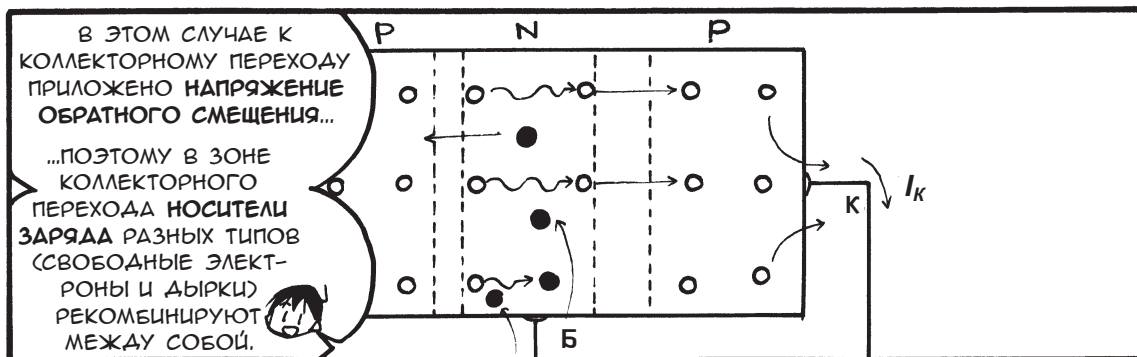
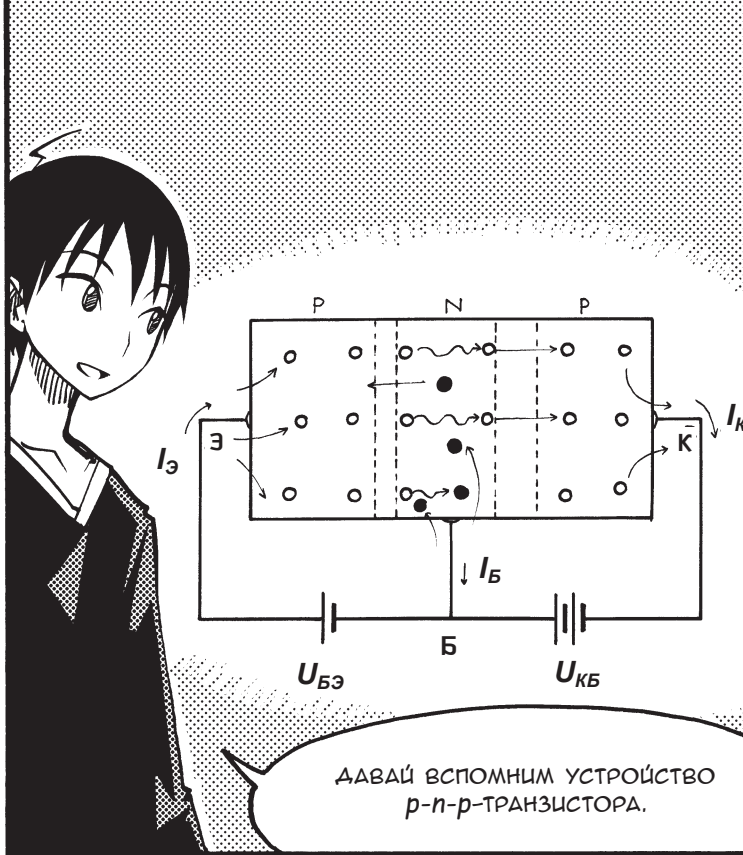
ЗАЧЕМ ЗДЕСЬ ЕЩЁ КАКОЙ-ТО «ЭФФЕКТ МИЛЛЕРА»?

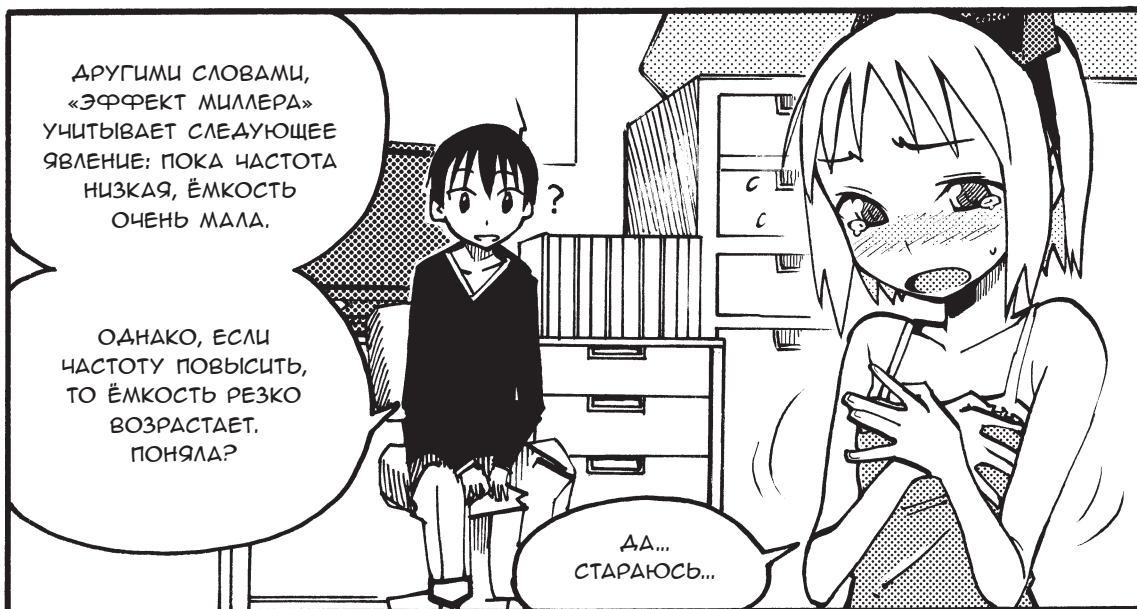
КОГДА К ЭМИТТЕРНОМУ ПЕРЕХОДУ ПРИКЛАДЫВАЕТСЯ НАПРЯЖЕНИЕ, ОН МОЖЕТ ВЕСТИ СЕБЯ КАК КОНДЕНСАТОР. ЗДЕСЬ УЧИТЫВАЕТСЯ ЭТО ЯВЛЕНИЕ.



КСТАТИ, НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ... ЧЕМ ВЫШЕ ЧАСТОТА СИГНАЛА, ТЕМ БОЛЬШЕ СТАНОВИТСЯ ЭТА ЁМКОСТЬ.





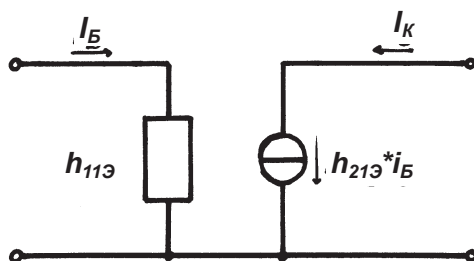


<Упрощение эквивалентной схемы для высоких частот>



КАК Я УЖЕ ОБЪЯСНЯЛ,
КОГДА РАССКАЗЫВАЛ ОБ
ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЕ
С h -ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ
УСИЛИТЕЛЯ С ОБЩИМ
ЭМИТТЕРОМ...

...ИСТОЧНИК ТОКА
ВЫХОДНОЙ ЦЕПИ
ОПИСЫВАЕТСЯ
ВЫРАЖЕНИЕМ $h_{21э} \cdot i_B$.



АА... АА!

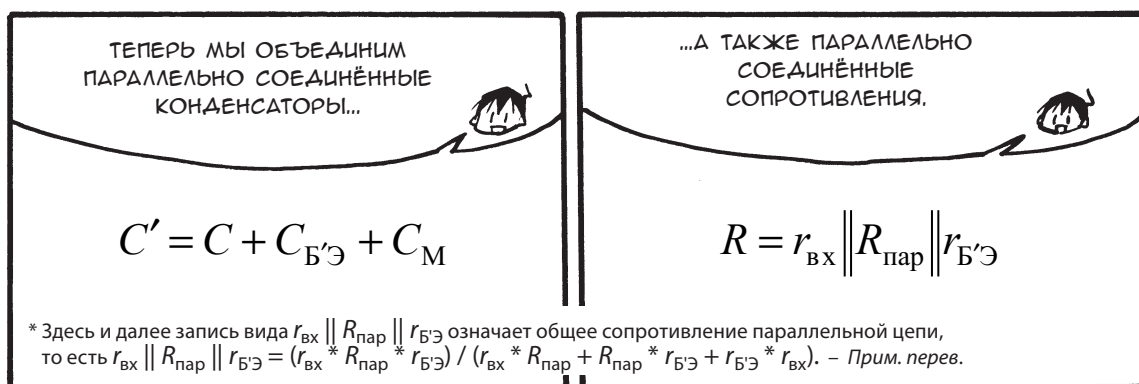
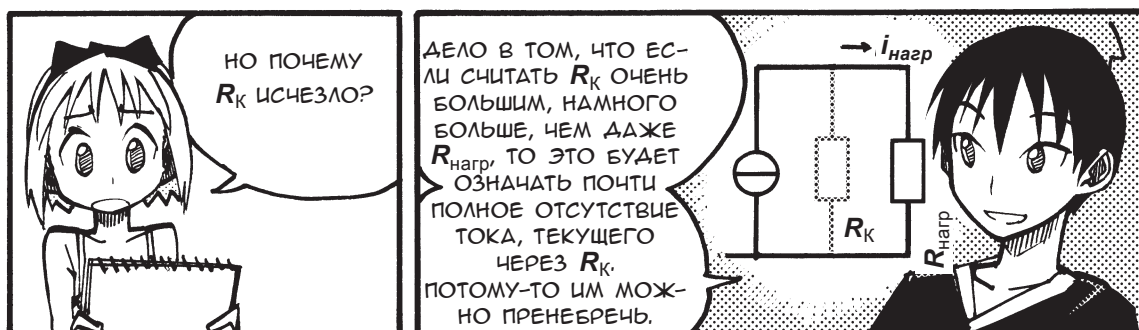
ОДНАКО, ПРИ ИЗУЧЕНИИ
ВХОДНОЙ ЦЕПИ ЛЕГЧЕ
РАССМАТРИВАТЬ
НЕ ТОК БАЗЫ,

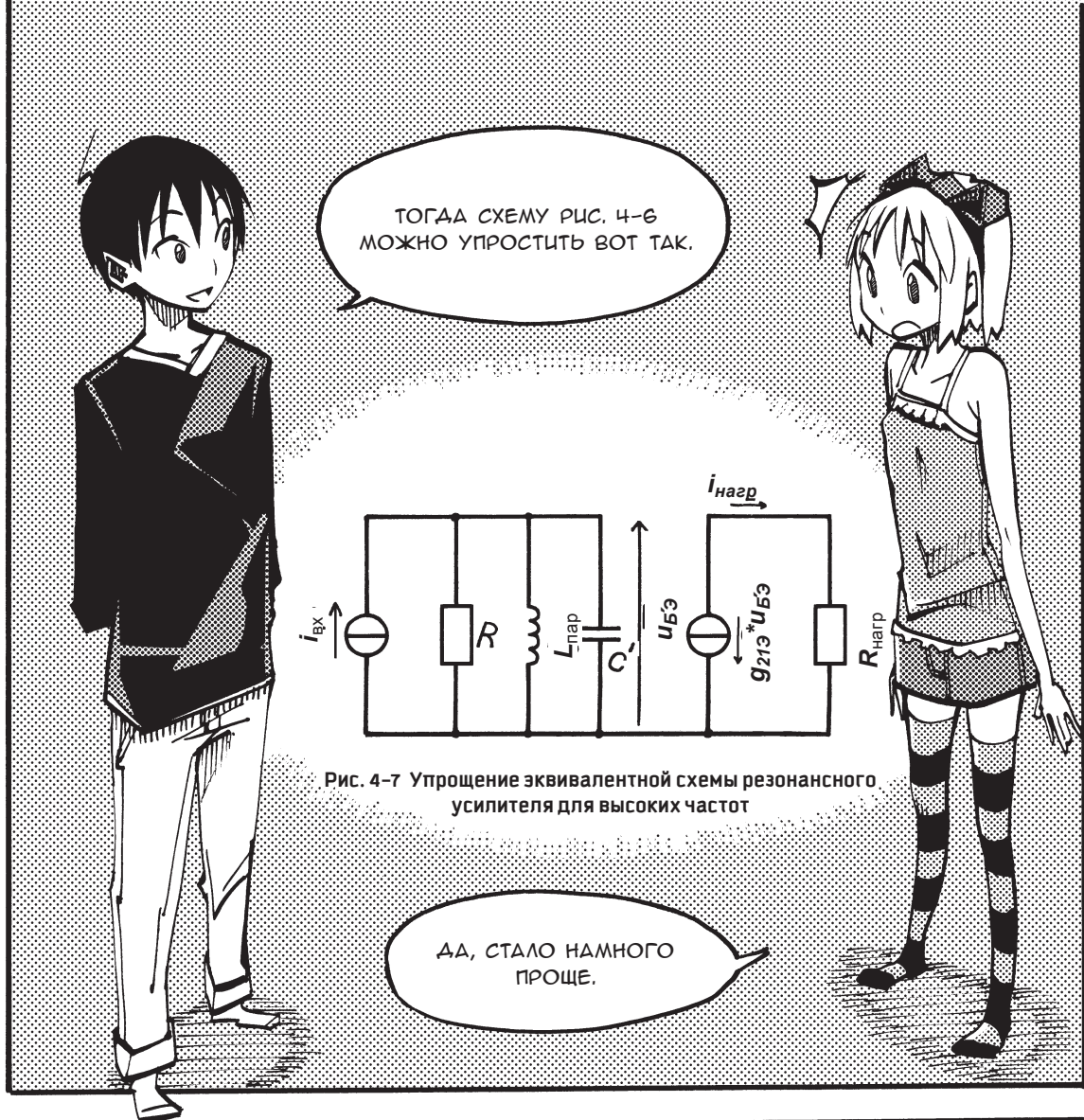
А НАПРЯЖЕНИЕ $U_{БЭ}$
НА ЭМИТТЕРНОМ
ПЕРЕХОДЕ.

ТО ЕСТЬ В КАЧЕСТВЕ
ИСТОЧНИКА ТОКА ВМЕСТО
 $h_{21э} \cdot i_B$ МЫ ИСПОЛЬЗУЕМ
 $g_{21э} \cdot U_{БЭ}$, ГДЕ $g_{21э}$ - ЭТО
ПРОВОДИМОСТЬ ПРЯМОЙ
ПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМЕ
 g -ПАРАМЕТРОВ.

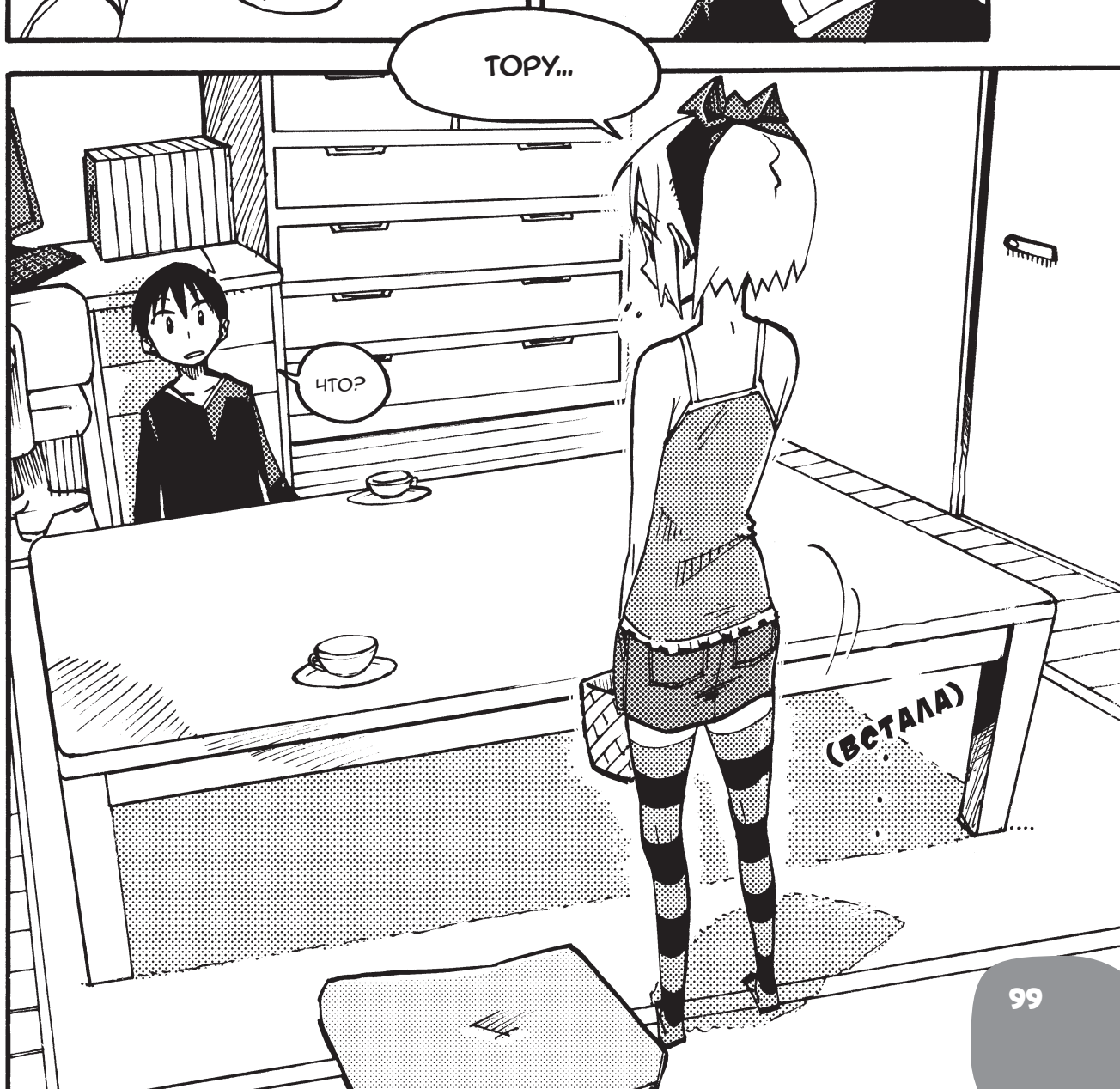
ШУРХ, ШУРХ

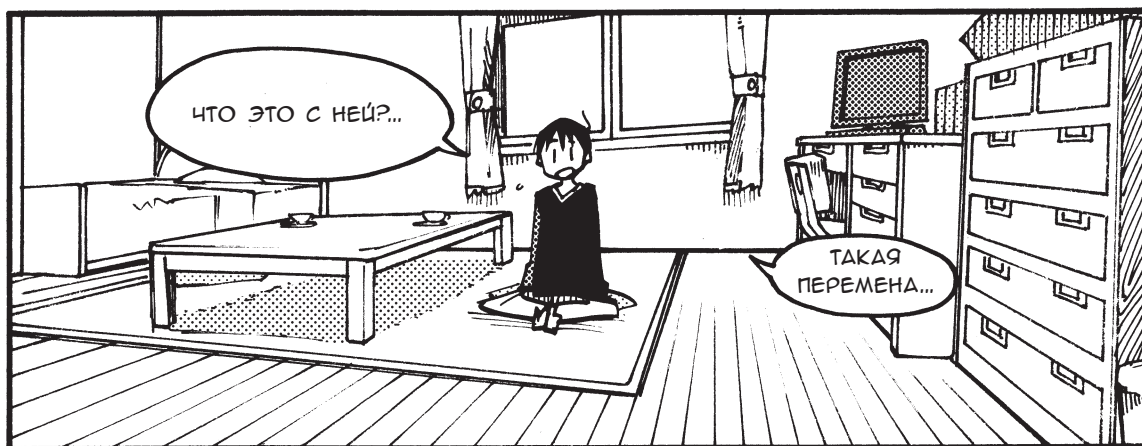












ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Частотная характеристика коэффициента передачи тока для резонансного усилителя

Коэффициент передачи тока K_i для схемы на рис. 4-7 равен отношению выходного тока $i_{\text{нагр}}$ к входному току $i_{\text{вх}}$.

$$K_i = i_{\text{нагр}} / i_{\text{вх}}$$



ЗДЕСЬ ВХОДНОЙ ТОК $i_{\text{вх}}$
и ВЫХОДНОЙ ТОК $i_{\text{нагр}}$
МОЖНО ВЫРАЗИТЬ ТАК.

$$i_{\text{вх}} = \left\{ \frac{1}{R} + j\omega C' + \frac{1}{j\omega L_{\text{пар}}} \right\} u_{\text{Б'Э}}$$

$$i_{\text{нагр}} = -g_{21Э} u_{\text{Б'Э}} \quad (*)$$

* Знак «минус» выбран в соответствии с эквивалентной схемой на рис. 4-7. – Прим. перев.



ПОДСТАВЛЯЯ
ВЫРАЖЕНИЯ ТОКОВ,
ПОЛУЧИМ СЛЕДУЮЩЕЕ...

$$K_i = \frac{-g_{21Э} R}{1 + g_{21Э} R \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

Здесь ω_0 означает резонансную угловую частоту (то есть частоту, при которой входной ток будет максимальным), а Q_i – добротность резонансного контура (показывает возможность обеспечить большой K_i для резонансной частоты и малый K_i для частот, отличных от резонансной). Математически они выражаются так:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{пар}} C'}} = 2\pi f_0 \quad Q_i = \frac{R}{\omega_0 L_{\text{пар}}} = \omega_0 C' R$$



ПОДСТАВИВ ЭТИ ВЕЛИЧИНЫ,
ПОЛУЧИМ ФОРМУЛУ ДЛЯ
ПОСТРОЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ.

$$K_i = \frac{-g_{21Э} R}{1 + g_{21Э} R \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

Давайте воспользуемся этой формулой и построим частотную характеристику резонансного усилителя.

Частотная характеристика выражается следующей функцией:

$$|K_i| = \frac{g_{21}R}{\sqrt{1 + Q_i^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}},$$

график которой выглядит вот так.

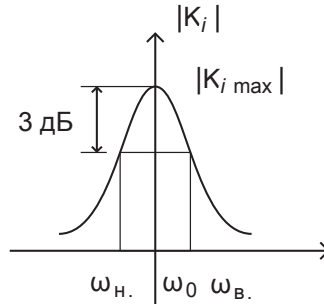


Рис. 4-А1 Частотная характеристика коэффициента передачи тока для резонансного усилителя

На графике частотной характеристики, показанной на рис. 4-А1, по горизонтальной оси откладываются угловые частоты ω («омега»), а по вертикальной оси — коэффициент передачи тока K_i .

Этот график показывает, что коэффициент передачи тока максимален на угловой частоте ω_0 и снижается на частотах выше или ниже ω_0 . Именно поэтому мы настраиваем конденсатор радиоприёмника таким образом, чтобы ω_0 стала равной частоте радиостанции, умноженной на 2π .



ЗДЕСЬ $\omega_н$ И $\omega_в$ — ЭТО ТАКИЕ ЧАСТОТЫ, НА КОТОРЫХ K_i СНИЖАЕТСЯ НА 3 ДБ ПО СРАВНЕНИЮ С $K_{i \max}$, РАССЧИТЫВАЮТСЯ ОНИ ВОТ ТАК:

$$\omega_в = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q_i}$$

$$\omega_н = \omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q_i}$$

Далее, ширина полосы частот будет равна $\omega_в - \omega_н$. Желательно, чтобы она равнялась ширине спектра (показанного в манге), то есть $2\omega_2 (2f_2)$.

Следует заметить, что форма волны на выходе резонансного усилителя, о которой шла речь в этой главе, ещё не позволит нам услышать звук в радиоприёмнике, так как это всё ещё модулированная волна. Следовательно, дальше из этой амплитудно-модулированной волны нужно будет извлечь звуковую составляющую.

Эквивалентная схема транзистора для высоких частот

В области p - n -переходов транзистора возникают паразитные ёмкости, которыми, как считается, нельзя пренебрегать на высоких частотах. Кстати, если обозначить паразитную ёмкость эмиттерного перехода за $C_{Б'Э}$, а коллекторного – за $C_{Б'К}$, то их можно представить в виде конденсаторов, подключенных так, как показано на рис. 4-А2.

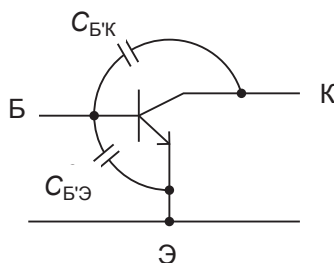
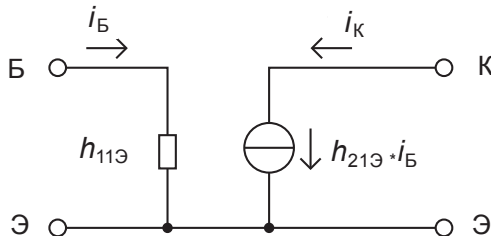
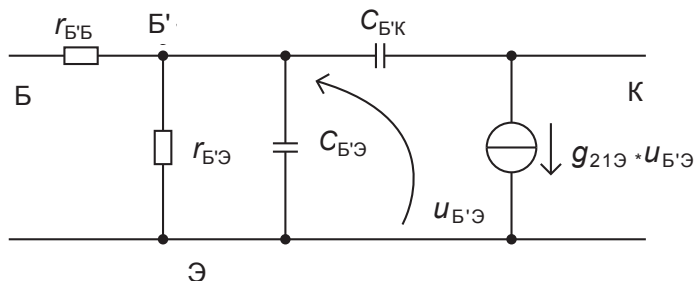


Рис. 4-А2 Представление паразитных ёмкостей, возникающих в транзисторе

Эквивалентная схема транзистора с этими паразитными ёмкостями показана на рис. 4-А3. Другими словами, взяв за основу упрощённую эквивалентную схему (стр. 72), мы подключили между её базой и эмиттером конденсатор $C_{Б'Э}$, а между базой и коллектором – конденсатор $C_{Б'К}$.



(а) Эквивалентная схема транзистора без паразитных ёмкостей



(б) Эквивалентная схема транзистора с добавленными паразитными ёмкостями

Рис. 4-А3 Эквивалентная схема транзистора с учётом паразитных ёмкостей

На схеме рис. 4-А3 сопротивление $r_{ББ}$ – это сопротивление базы, составляющее всего около 10 Ом. Сопротивление $r_{БЭ}$ – это сопротивление участка «база-эмиттер», имеющее тот же смысл, что и параметр $h_{11Э}$. Кроме того, для упрощения дальнейших рассуждений источник тока $h_{21Э} \cdot i_{Б}$, управляемый током $i_{Б}$, мы заменили на источник тока $g_{21} \cdot u_{БЭ}$, управляемый напряжением $u_{БЭ}$.

Теперь давайте рассмотрим эквивалентную схему усилителя с общим эмиттером, подобную схеме рис. 4-А4. Эта схема аналогична эквивалентной схеме, о которой пойдёт речь в главе 6, но здесь мы изучим её с точки зрения учёта паразитных ёмкостей транзистора.

В главе 6 будут рассматриваться звуковые частоты, на которых паразитные ёмкости проблем не создают.

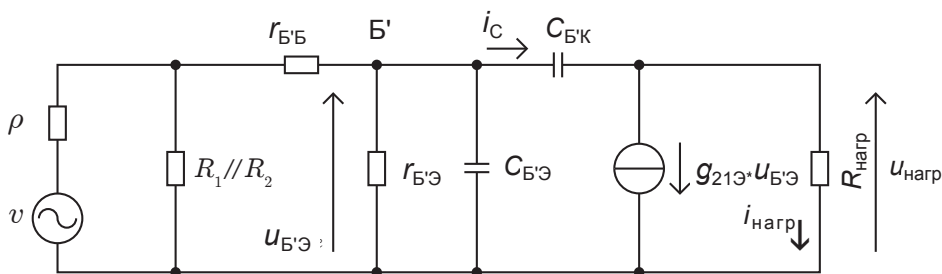


Рис. 4-А4 Эквивалентная схема усилителя с общим эмиттером для переменного тока, в которой транзистор заменён электрической моделью с рис. 4-А3

Далее мы проведём преобразование к схеме с параллельным соединением конденсаторов $C_{БК}$ и $C_{БЭ}$. Зачем это нужно? Дело в том, что при параллельном соединении конденсаторов их общая ёмкость представляется в виде суммы. Кроме того, в эквивалентной схеме с h -параметрами вход $h_{11Э}$ и выход $h_{21Э} \cdot i_{Б}$ отделены друг от друга, что упрощает рассуждения, как вы сами увидите в главе 6. Поэтому здесь лучше отделить левую часть схемы, включающую $C_{БК}$, от контура, содержащего $g_{21} \cdot u_{БЭ}$ и $R_{нагр}$. Итак, займёмся расчётом элементов схемы рис. 4-А5.

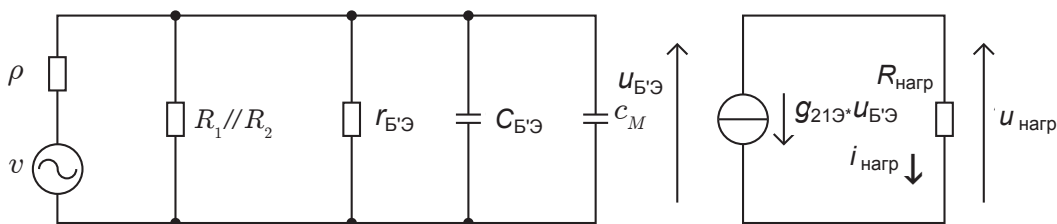


Рис. 4-А5 Эквивалентная схема усилителя с общим эмиттером для переменного тока (преобразование схемы рис. 4-А4)

Порядок расчётов при переходе от схемы рис. 4-А4 к схеме рис. 4-А5

- 1) Сопротивление базы $r_{Б'Б}$ сравнительно мало, поэтому пренебрегаем им.
- 2) Ток i_C , текущий через паразитную ёмкость $C_{Б'К}$ коллекторного перехода, рассчитывается по формуле, следующей из второго правила Кирхгофа.

$$i_C = j\omega C_{Б'К} (u_{Б'Э} - u_{нагр})$$

- 3) Падение напряжения на нагрузке $u_{нагр}$ вычисляется так:

$$u_{нагр} = i_{нагр} * R_{нагр}$$

По теореме наложения ток нагрузки $i_{нагр}$ можно представить как сумму токов, по отдельности создаваемых в нагрузке источником тока ($g_{21Э} * u_{Б'Э}$) и напряжением $u_{Б'Э}$ на входе, то есть

$$i_{нагр} = -g_{21Э} \cdot u_{Б'Э} + \frac{u_{Б'Э}}{\frac{1}{j\omega C_{Б'К}} + R_{нагр}} = \left(-g_{21Э} + \frac{j\omega C_{Б'К}}{1 + \frac{R_{нагр}}{j\omega C_{Б'К}}} \right) \cdot u_{Б'Э}$$

Если при этом считать, что

$$R_{нагр} \gg \frac{1}{j\omega C_{Б'К}}, \quad g_{21Э} \gg j\omega C_{Б'К},$$

то вторым слагаемым, которое соответствует протеканию тока i_C через сопротивление нагрузки, можно пренебречь. Значит, разрыв ветви с паразитной ёмкостью не окажет заметного влияния на выходную цепь.

На основании этого можно записать:

$$u_{нагр} \approx -g_{21Э} * R_{нагр} u_{Б'Э}$$

- 4) Подставляя это в первую формулу, найдём ток i_C

$$i_C = j\omega C_{Б'К} (u_{Б'Э} - u_{нагр}) = j\omega C_{Б'К} (1 + g_{21Э} * R_{нагр}) u_{Б'Э}$$

Наконец, приведём паразитную $C_{Б'К}$ ёмкость ко входу схемы, то есть найдём такую эквивалентную ёмкость C_M , которая при подключении между базой и эмиттером создаст во входной цепи дополнительный ток i_C .

$$Z_{Б'Э} = \frac{1}{j\omega C_M} = \frac{u_{Б'Э}}{i_C} = \frac{1}{j\omega C_{Б'К} (1 + g_{21Э} \cdot R_{нагр})}$$

Следовательно,

$$C_M = 1 + g_{21Э} * R_{нагр}$$

- 5) Полученное выражение $C_M = C_{Б'К} (1 + g_{21Э} * R_{нагр})$ означает, что наличие у коллекторного перехода **паразитной ёмкости** эквивалентно конденсатору емкости $C_{Б'К} (1 + g_{21Э} * R_{нагр})$, подключенному между базой и эмиттером. Это называется **эффeктом Миллера**, а соответствующая ёмкость – **ёмкостью Миллера** (C_M).

Таким образом, мы можем использовать эквивалентную схему транзистора для высоких частот, показанную на рис. 4-А6.

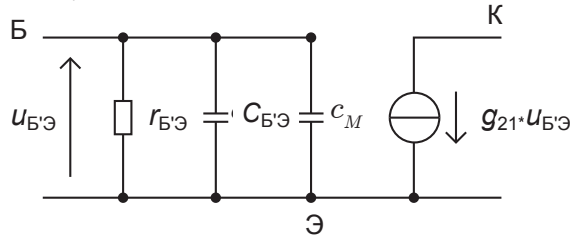


Рис. 4-А6 Преобразование эквивалентной схемы транзистора для высоких частот (получилась такая же схема, как на рис. 4-7)

▶ Пересчёт импедансов

Адмитанс Y_1 (полная проводимость – величина, обратная импедансу) цепи на рисунке слева на стр. 89 равен следующему:

$$Y_1 = \frac{1}{(r_{кат} + j\omega L)} = \frac{(r_{кат} - j\omega L)}{r_{кат}^2 + \omega^2 L^2}$$

Адмитанс Y_2 цепи на рисунке справа на той же странице:

$$Y_2 = \frac{1}{R_{пар}} + \frac{1}{j\omega L_{пар}}$$

Так как должно выполняться равенство $Y_1 = Y_2$,
$$\frac{(r_{кат} - j\omega L)}{r_{кат}^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1}{R_{пар}} + \frac{1}{j\omega L_{пар}}$$

из равенства действительных частей следует, что

$$R_{пар} = \frac{r_{кат}^2 + \omega^2 L^2}{r_{кат}},$$

а из равенства мнимых частей:

$$L_{пар} = \frac{r_{кат}^2 + \omega^2 L^2}{\omega^2 L}$$

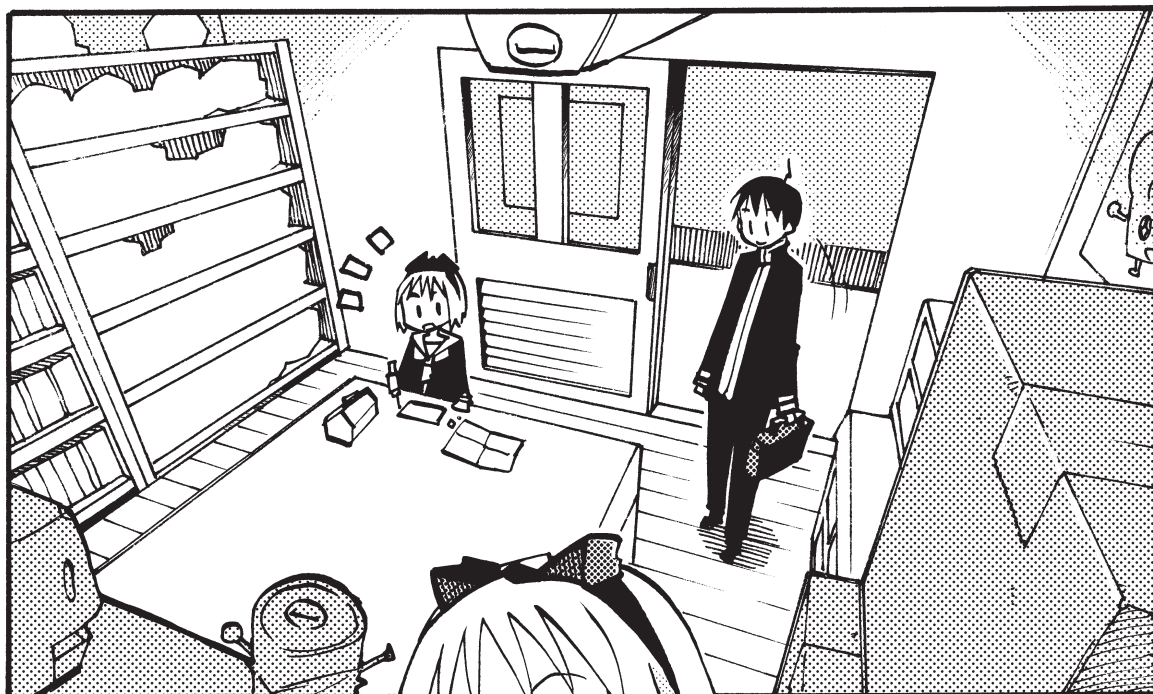
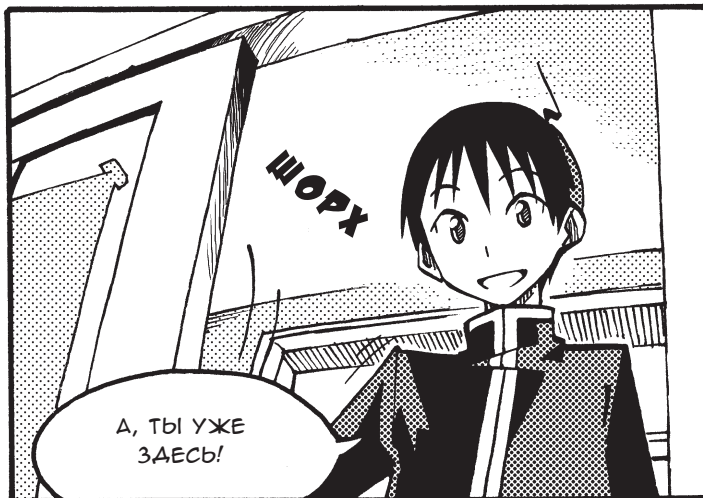
Полученные формулы помогут преобразовать последовательные цепи в параллельные.

5 ГЛАВА

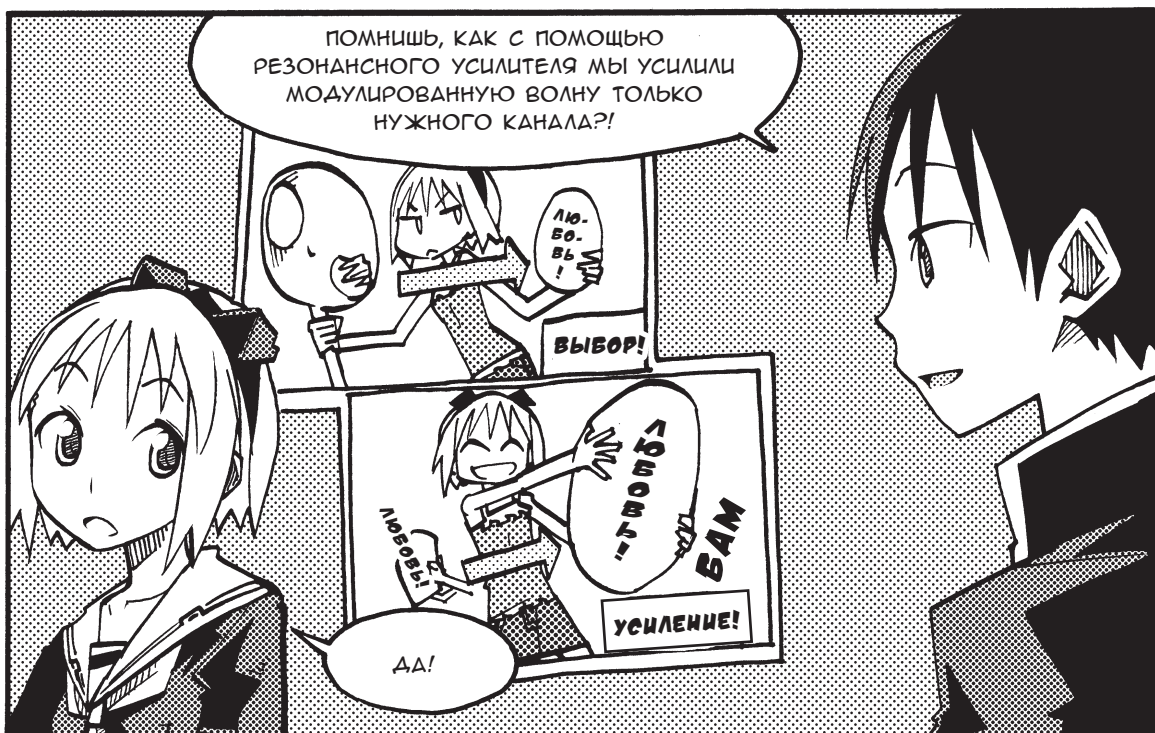
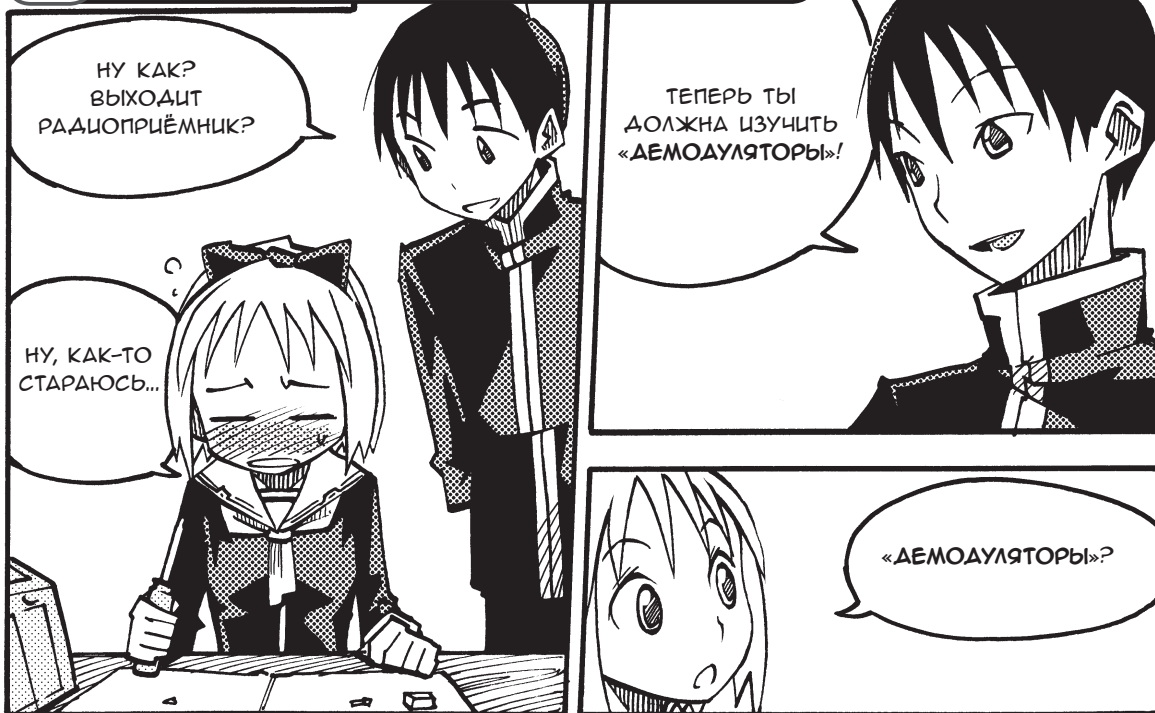
ДЕМОДУЛЯТОРЫ

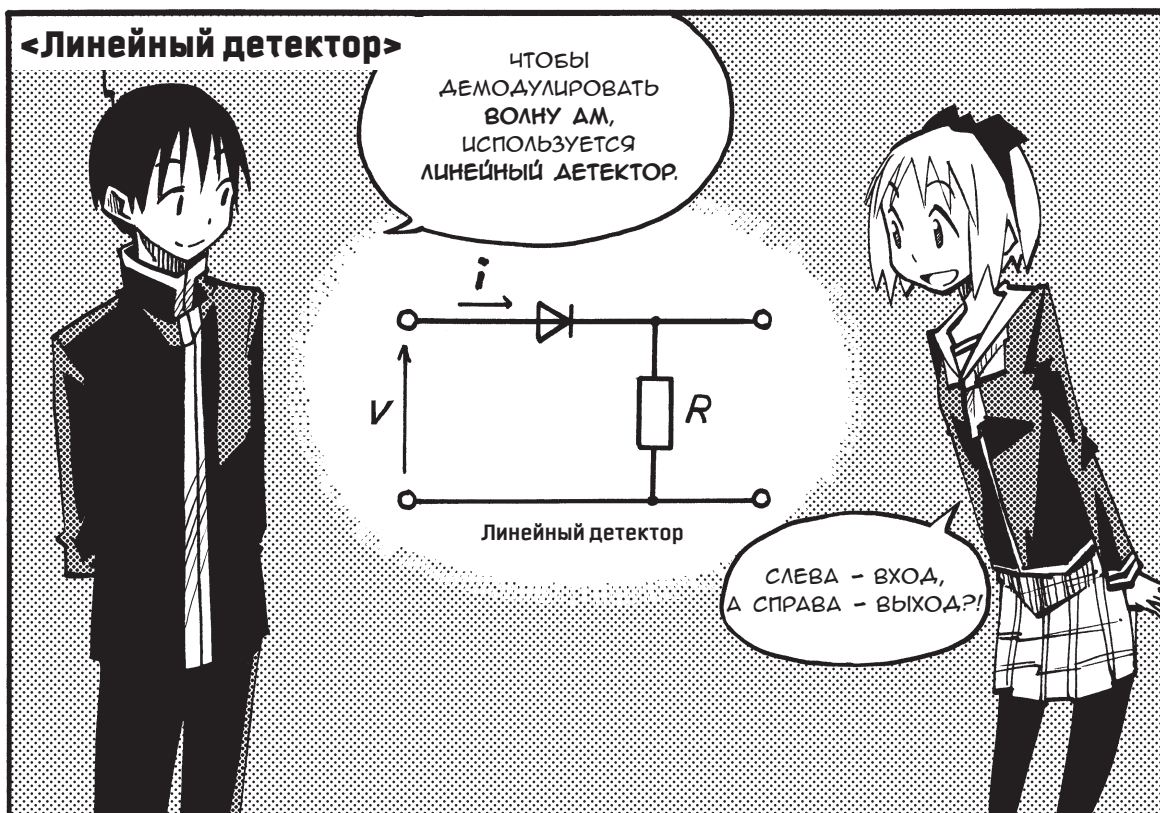
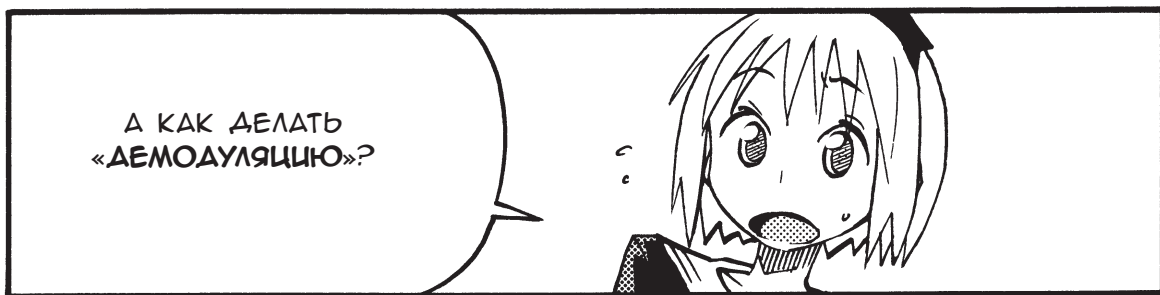






5.1. ДЕМОДУЛЯЦИЯ И ЛИНЕЙНЫЙ ДЕТЕКТОР

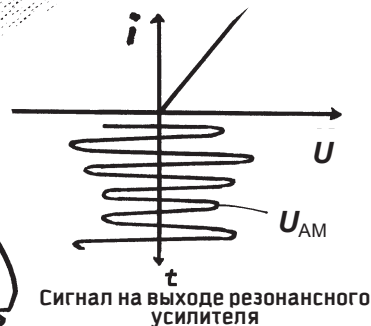




«Принцип линейного детектирования»

ОБЪЯСНЮ
ПРИНЦИП
ЛИНЕЙНОГО
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ.

ВОТ ЭТА ВОЛНА -
СИГНАЛ НА ВЫХОДЕ
РЕЗОНАНСНОГО
УСИЛИТЕЛЯ...



Сигнал на выходе резонансного
усилителя

ДАВАЙ!

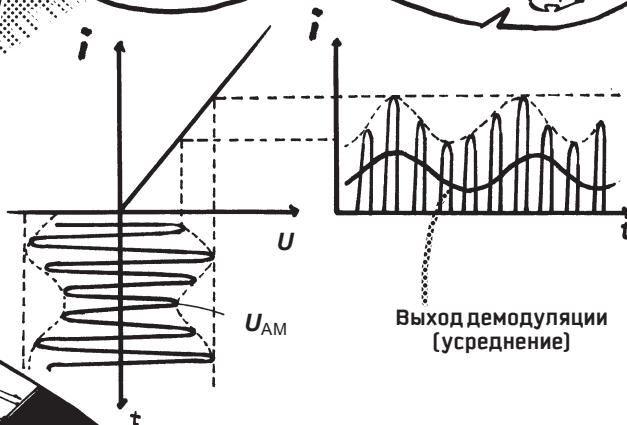
А ЭТО - ВОЛНА НА
ВЫХОДЕ ЛИНЕЙНОГО
ДЕТЕКТОРА.



Волна на выходе линейного
детектора

ЕСЛИ ЗАТЕМ
УСРЕДНИТЬ ЭТУ ВОЛНУ,
ТО ПОЛУЧИТСЯ ФОРМА
СИГНАЛА, ПОКАЗАННАЯ
ЖИРНОЙ ЛИНИЕЙ.
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
«ВЫХОДОМ
ДЕМОДУЛЯЦИИ».

ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
«ВЫХОДА
ДЕМОДУЛЯЦИИ»
ИСПОЛЬЗУЮТ
«ФИЛЬТРЫ».

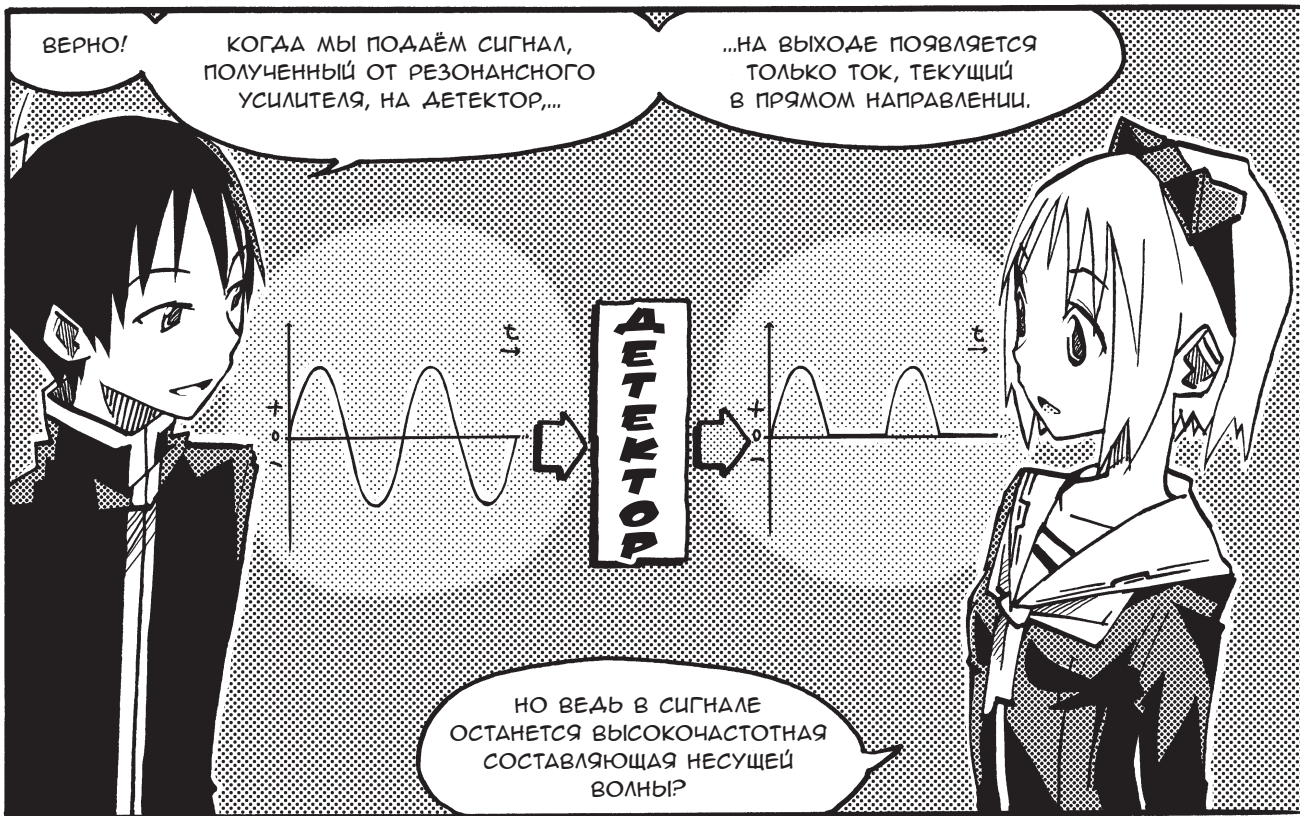
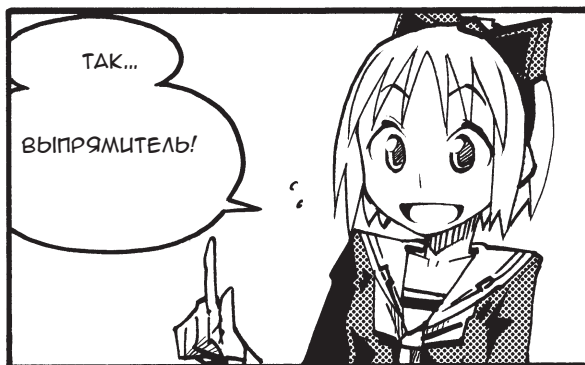


Выход демодуляции
(усреднение)

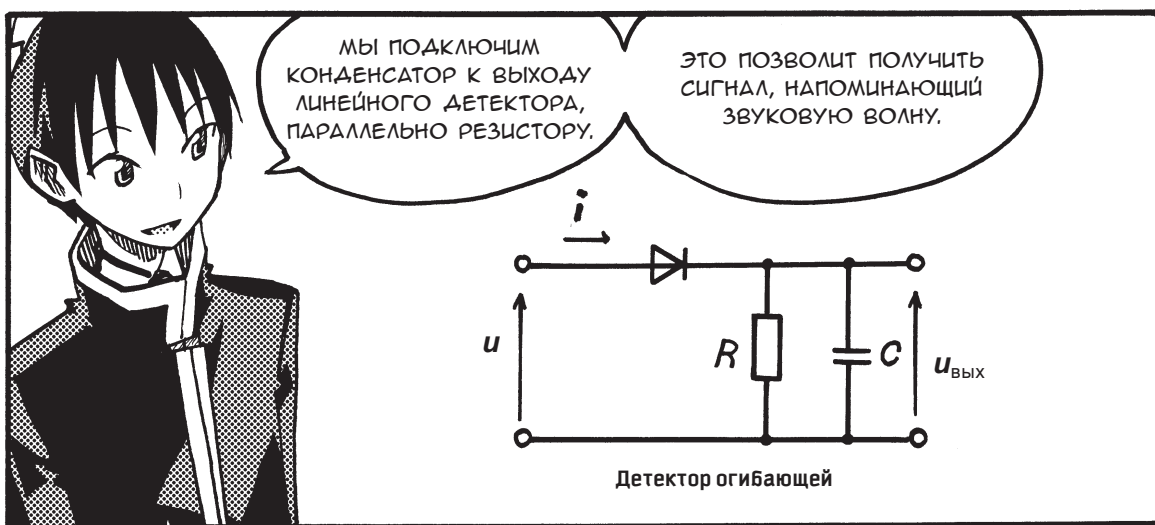
ДА, ТЫ
РАНЬШЕ
ГОВОРИЛ
ПРО
ФИЛЬТРЫ...

ДА!

ПРО
ФИЛЬТРЫ Я
ОБЪЯСНЮ
ПОТОМ, А
СПЕРВА...



5.2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ



5.3. ФИЛЬТРЫ

ТЕПЕРЬ ПОГОВОРИМ
О ФИЛЬТРАХ.

Я ИМЕЮ В ВИДУ ФИЛЬТРЫ,
КОТОРЫЕ ПРОПУСКАЮТ
ТОЛЬКО НЕОБХОДИМЫЕ
СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИГНАЛА,
ЗАДЕРЖИВАЯ ОСТАЛЬНЫЕ.

ПОНЯТНО

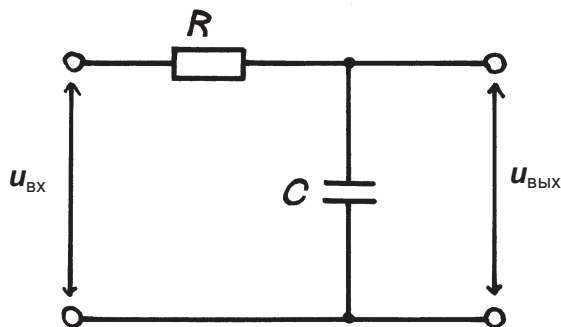
СУЩЕСТВУЕТ 2 ВИДА
ФИЛЬТРОВ:
«ФИЛЬТРЫ ВЕРХНИХ ЧАСТОТ»
И «ФИЛЬТРЫ НИЖНИХ
ЧАСТОТ».

НАЧНЁМ С ФИЛЬТРОВ
НИЖНИХ ЧАСТОТ.

ДАВАЙ.

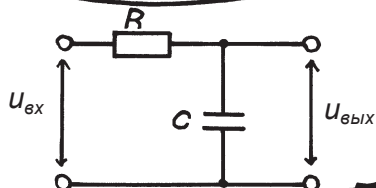
<Фильтр нижних частот>

ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ - ЭТО
ФИЛЬТР, ПРОПУСКАЮЩИЙ ТОЛЬКО
НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ
СИГНАЛА.



Фильтр нижних частот (ФНЧ)

ЕСЛИ ВХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ
ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ
ОБОЗНАЧИТЬ $U_{вх}$,
А ВЫХОДНОЕ $U_{вых}$



ТО КОЭФФИЦИЕНТ
ПЕРЕДАЧИ ПО
НАПРЯЖЕНИЮ БУДЕТ
ВОТ ТАКИМ.

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{1}{1+j\omega CR}$$

СОГЛАСНО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ,
ПРИ ВЫСОКИХ УГЛОВЫХ
ЧАСТОТАХ $\omega (= 2\pi f)$,
КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ
ПО НАПРЯЖЕНИЮ K_u БУДЕТ
СТРЕМИТЬСЯ К НУЛЮ.

ЭТО ПОЗВОЛЯЕТ
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДАННЫЙ
ФИЛЬТР ДЛЯ ПРОПУСКАНИЯ
ЧАСТОТ НИЖЕ

$$f = \frac{1}{2\pi fCR}$$

ПОНЯТНО! ВЫСОКИЕ
ЧАСТОТЫ СРЕЗАЮТСЯ,
ПОТОМУ ЧТО ДЛЯ НИХ
 K_u СТРЕМИТСЯ К НУЛЮ!

$$K_u = \frac{1}{1+j\omega CR}$$

<Фильтр верхних частот>

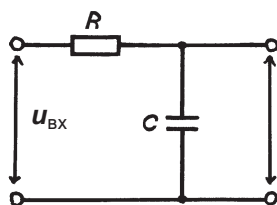
А ЧТО ТАКОЕ
ТОГДА ФИЛЬТР
ВЕРХНИХ
ЧАСТОТ...?

МОЖЕШЬ
СЧИТАТЬ,
ЧТО ЭТО
ПЕРЕВЕРНУТЫЙ
ФИЛЬТР НИЖНИХ
ЧАСТОТ.

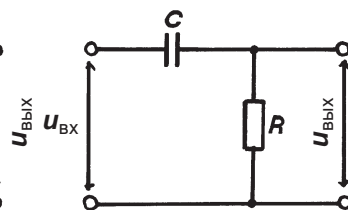
ОНИ ПРОПУСКАЮТ
ЧАСТОТЫ ВЫШЕ

$$f = \frac{1}{2\pi fCR}$$

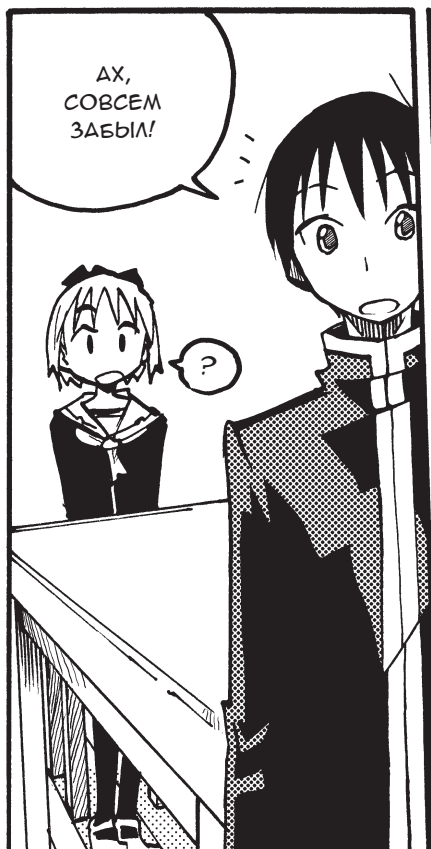
ЕСЛИ В ФИЛЬТРЕ
НИЖНИХ ЧАСТОТ
ПОМЕНЯТЬ МЕСТАМИ
R И C, ТО ПОЛУЧИТСЯ
ФИЛЬТР ВЕРХНИХ
ЧАСТОТ.

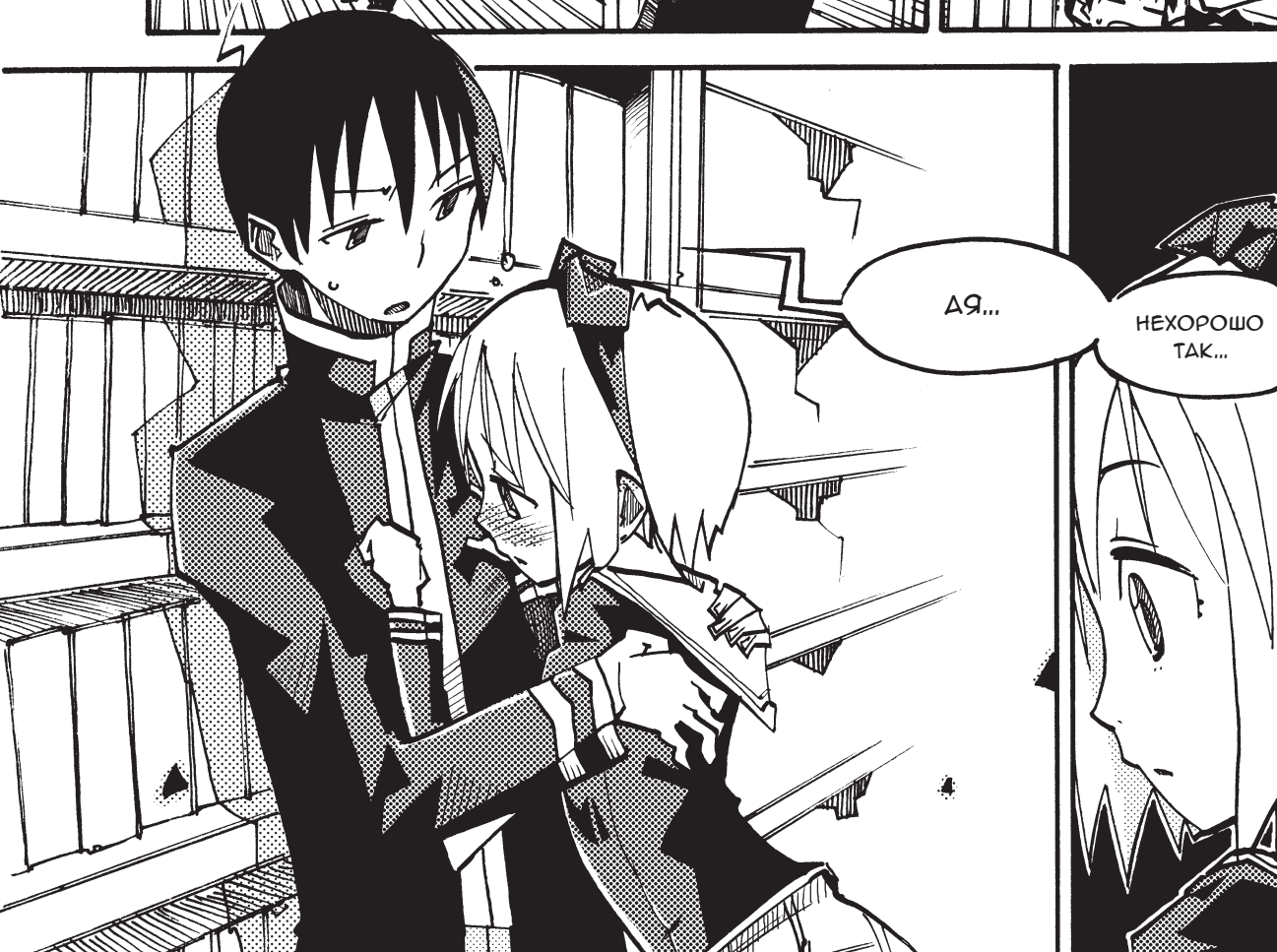


Фильтр нижних частот

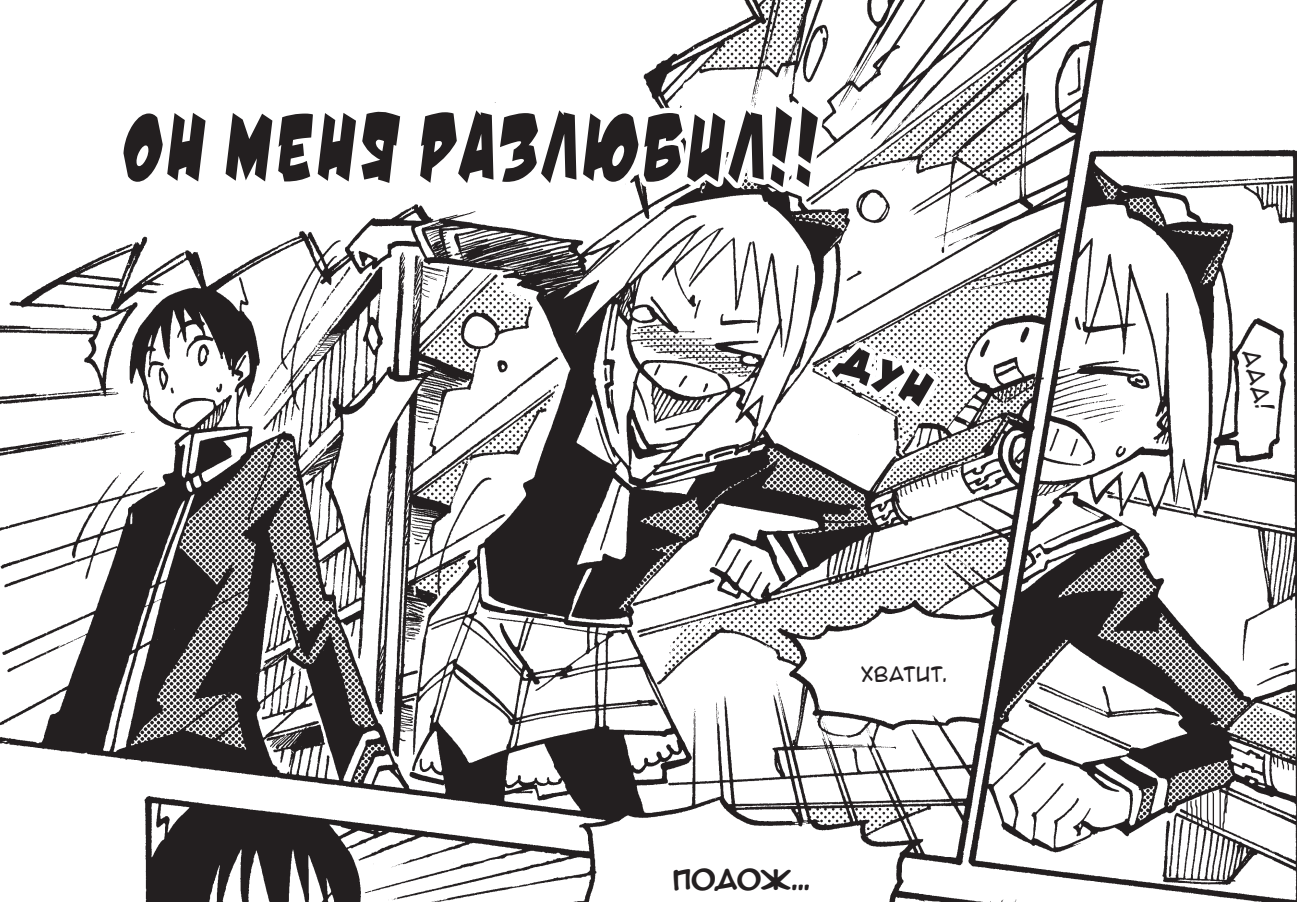


Фильтр верхних частот





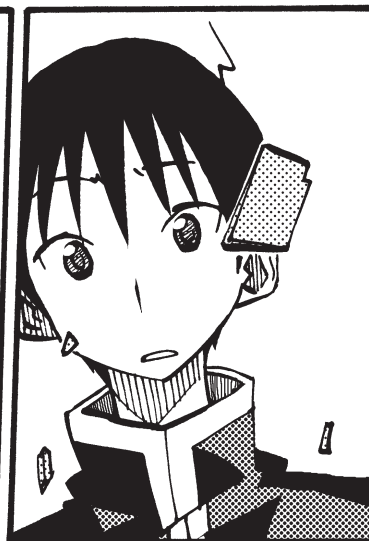
ОН МЕНЯ РАЗЛЮБИЛ!!



ХВАТИТ.



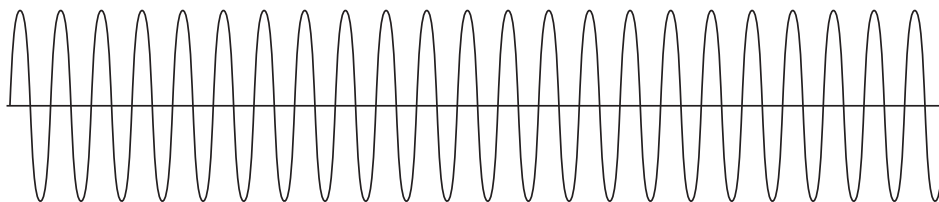
ПОДОЖ...
АЯ?
Я ВО ВСЕ ЭТОГО
НЕ ГОВОРИЛ...



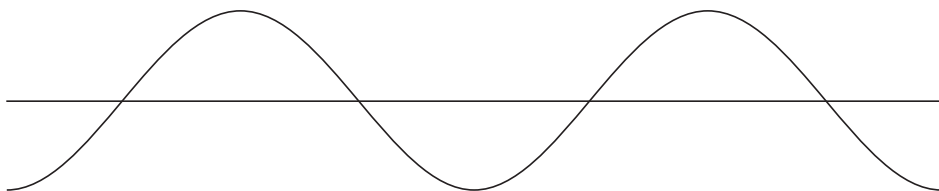
▶ О частотной модуляции (ЧМ)

Хотя в этой книге описывается **амплитудная модуляция (АМ)**, здесь я остановлюсь на ещё одном широко применяемом методе – **частотной модуляции (ЧМ)**. Она ещё обозначается латинскими буквами «FM», от английского «Frequency Modulation».

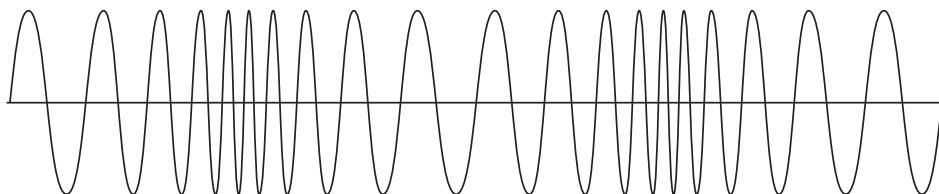
При частотной модуляции, например, в FM-радиовещании, несущая волна диапазона 76,0–90,0 МГц*, предназначенная для передачи в эфир, изменяет свою частоту в зависимости от силы сигнала. Другими словами, при частотной модуляции в зависимости от силы сигнала частота волны изменяется относительно несущей частоты (которая зависит от радиостанции; например, «NHK-FM Токио» использует частоту 82,5 МГц).



(а) Несущая волна



(б) Сигнал



(с) Частотно-модулированная волна

Рис. 5-А1 Принцип частотной модуляции

* Этот диапазон в России, Европе и Америке отличается от японского. – Прим. перев.

Таким образом, амплитуда частотно-модулированной волны постоянна, а частота ежемоментно изменяется. Даже если к такой волне добавляются помехи, её всё равно можно демодулировать – достаточно измерить частоту волны. Кроме того, в FM-радиовещании можно использовать полосу шириной 100 кГц, не опасаясь межканальной интерференции, что позволяет охватить весь спектр звуковых сигналов. Следовательно, по сравнению с АМ-радиовещанием, FM более помехоустойчиво, и можно сказать, больше подходит для музыкальных радиопередач, так как обеспечивает широкую полосу частот.

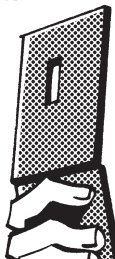
При частотной модуляции в **LC-генераторах** соразмерно сигналу изменяют L (величину индуктивности катушки) или C (величину ёмкости конденсатора). В случае, например, беспроводных микрофонов, частотная модуляция реализуется путём изменения ёмкости **варикапа**.

6 ГЛАВА

УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



Через одну
неделю...



АБОНЕНТ ВЫКЛЮЧЕН
ИЛИ НАХОДИТСЯ ВНЕ
ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ
СЕТИ...

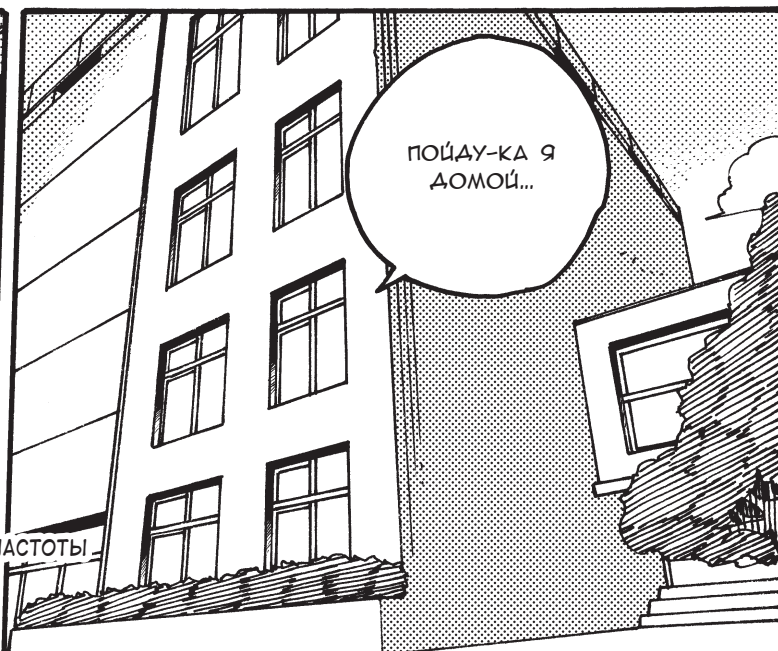


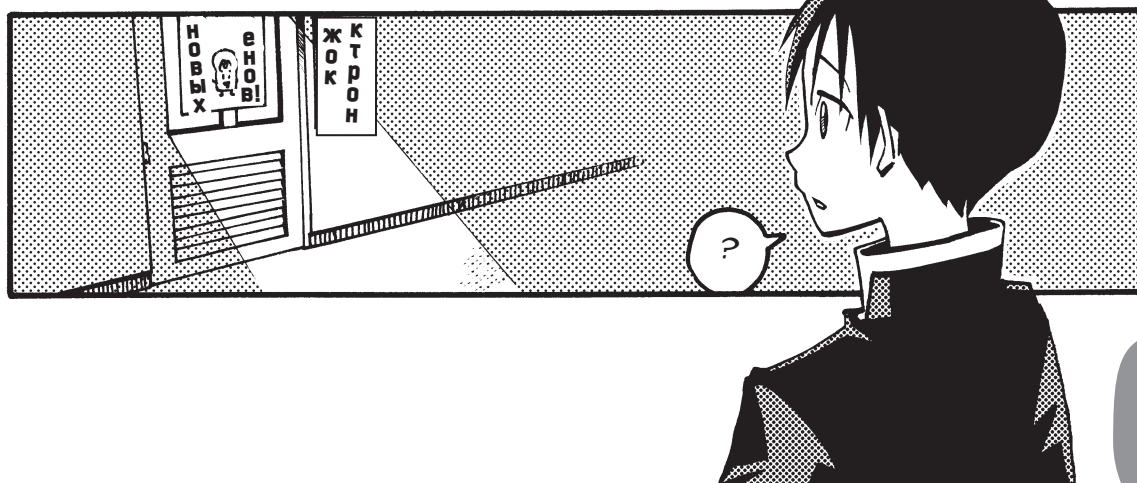
С ТОГО ДНЯ
ОНА ПЕРЕСТАЛА
ПРИХОДИТЬ
В КРУЖОК.

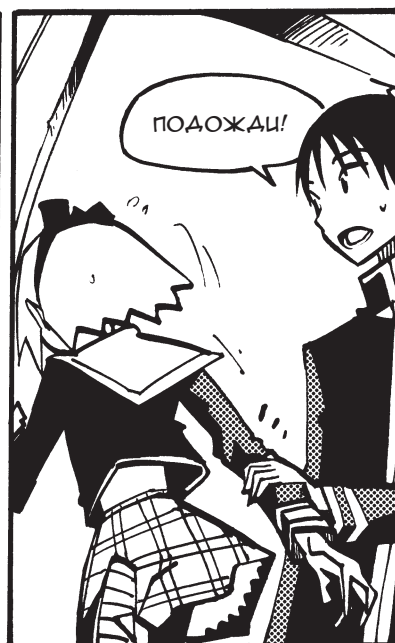
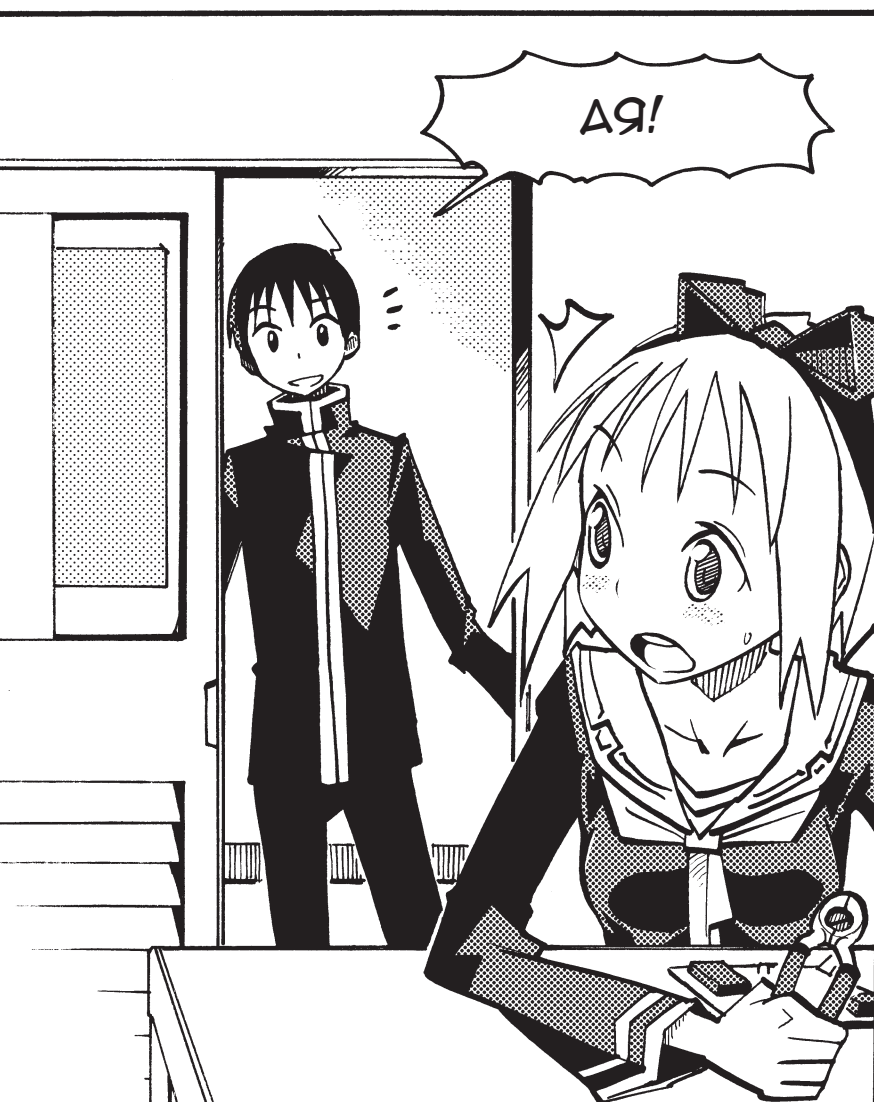
АЯ...
НАВЕРНОЕ, РЕШИЛА
ПОРВАТЬ С ЭТИМ...

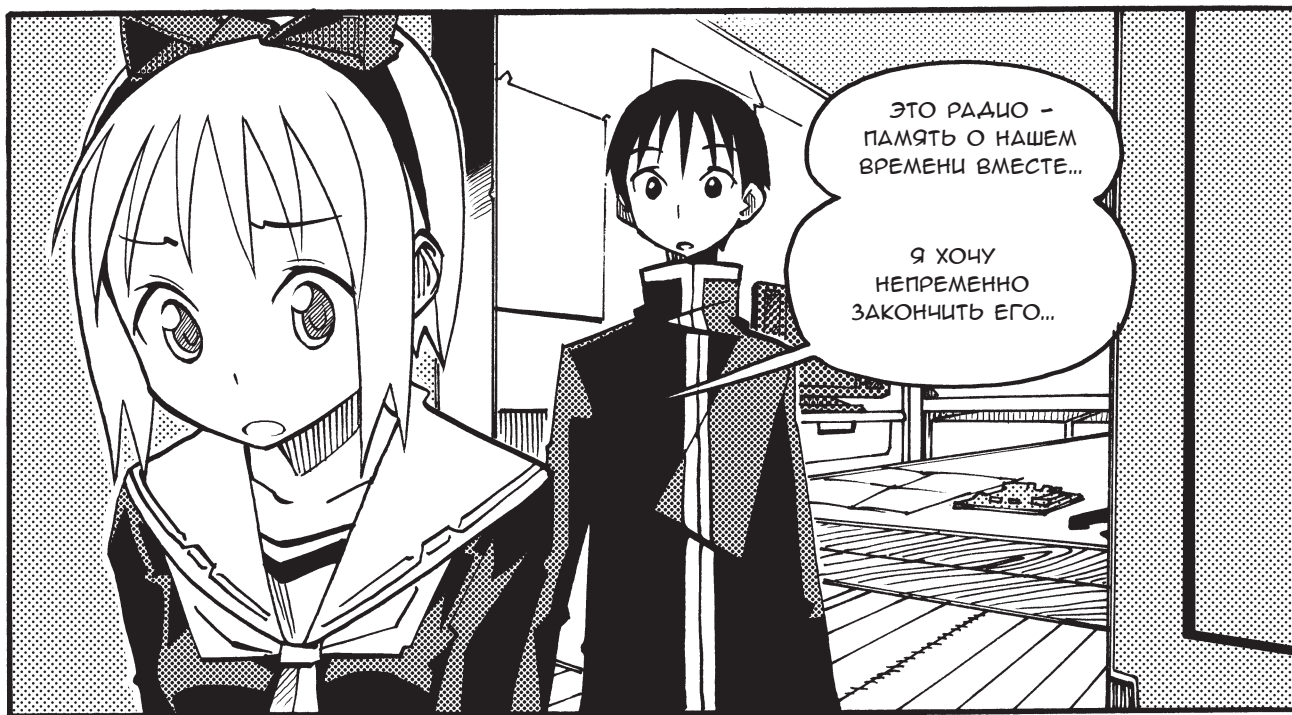
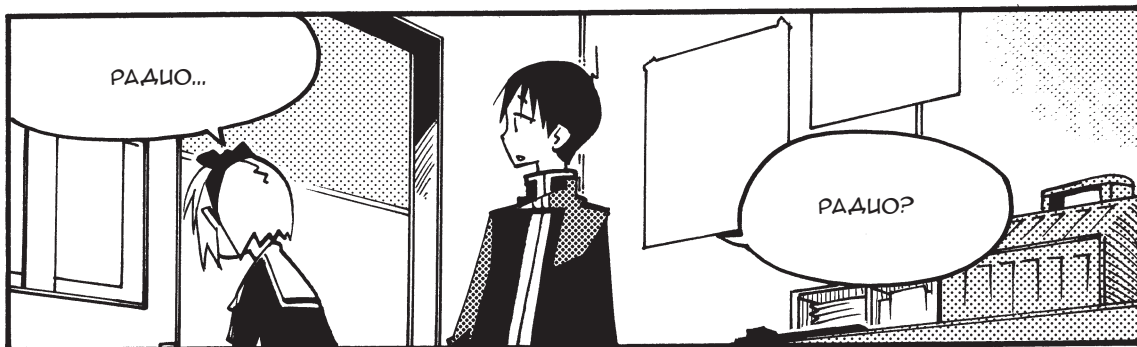


ПОЙДУ-КА Я
ДОМОЙ...

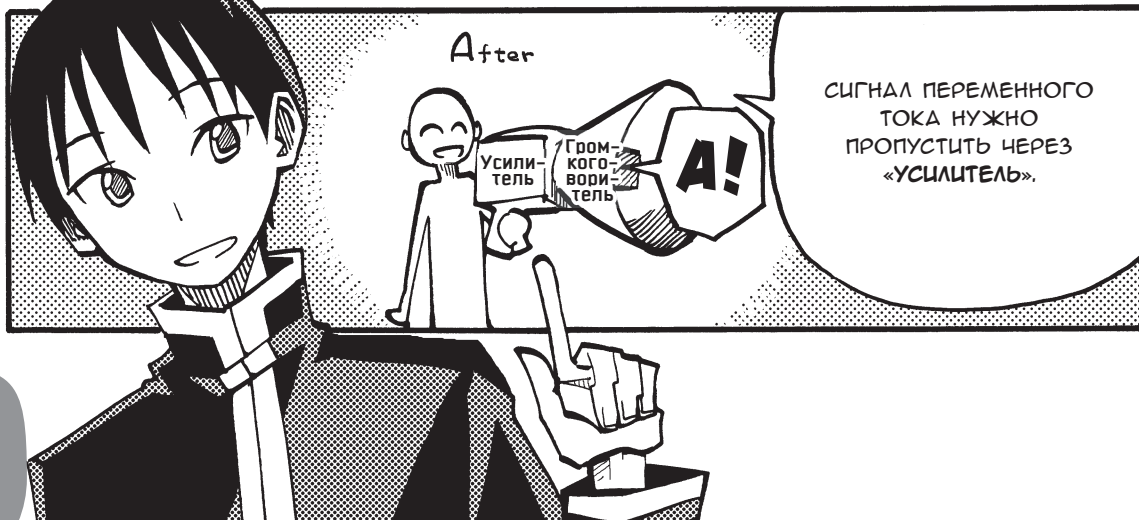
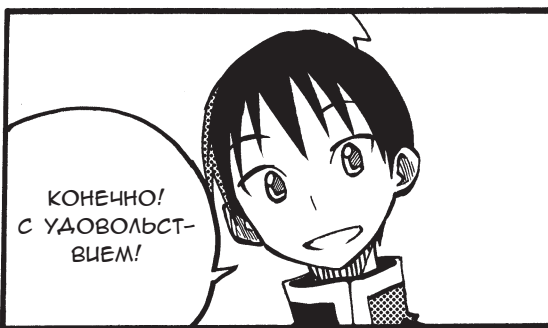








6.1. ЧТО ТАКОЕ УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



«Три типа усилителей»

УСИЛИТЕЛИ
НИЗКОЙ
ЧАСТОТЫ
БЫВАЮТ
ТРЕХ
ТИПОВ.

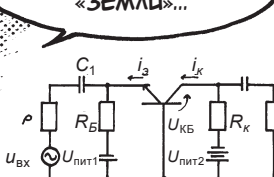
(1.) УСИЛИТЕЛИ
С ОБЩЕЙ БАЗОЙ (ОБ)

(2.) УСИЛИТЕЛИ
С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ
(ОЭ)

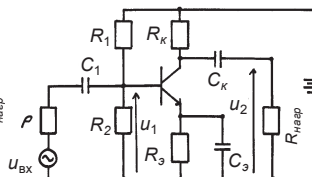
(3.) УСИЛИТЕЛИ С ОБЩИМ
КОЛЛЕКТОРОМ (ОК)

ММ...
А ЧЕМ ОНИ
ОТЛИЧАЮТСЯ?

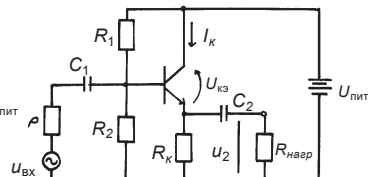
МЕСТОМ
ПОДКЛЮЧЕНИЯ
«ЗЕМЛИ»...



Усилитель с ОБ



Усилитель с ОЭ



Усилитель с ОК

...А ТАКЖЕ
СТЕПЕНЬЮ УСИЛЕНИЯ
СИГНАЛОВ.

СОЕДИНИВ

УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ
ЭМИТТЕРОМ И УСИЛИТЕЛЬ С
ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ, МЫ
СМОЖЕМ УСЛЫШАТЬ ЗВУК
РАДИО.

ПОЭТОМУ НА ЭТОТ
РАЗ Я РАССКАЖУ ОБ
ЭТИХ ДВУХ ТИПАХ
УСИЛИТЕЛЕЙ.

ПОНЯТНО!

6.2. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

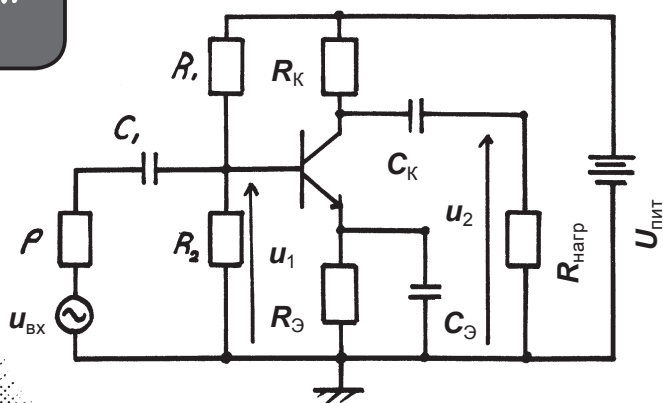


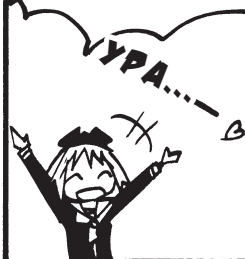
Рис. 6-1 Усилитель с общим эмиттером

ВОТ УСИЛИТЕЛЬ
С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ!

БЛАГОДАРЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
ЭТОЙ СХЕМЫ ВЫХОДНОЙ
ТОК СТАНОВИТСЯ В 100 РАЗ
БОЛЬШЕ ВХОДНОГО!

В 100 РАЗ!
КЛАССНО!!

ПОЭТОМУ МОЖЕТ
ПОКАЗАТЬСЯ, ЧТО
ТОЛЬКО ЭТИМ МОЖНО
ДОБИТЬСЯ ДОСТАТОЧНОГО ЭФФЕКТА
УСИЛЕНИЯ...



ЧТО?
ЭТО НА САМОМ
ДЕЛЕ НЕ ТАК?!

А Я ТАК
НАДЕЯЛАСЬ!!



НА САМОМ ДЕЛЕ, ИЗ-ЗА
БОЛЬШОГО ВХОДНОГО
ИМПЕДАНСА*...

* Импеданс для переменного
тока — это то же самое,
что сопротивление для
постоянного тока.

...ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ
ЭТОЙ СХЕМЫ НАПРЯМУЮ
К ГРОМКОГОВОРИТЕЛЮ
ЗВУКА НЕ БУДЕТ.



Усилитель
с общим
эмиттером

О-ХО-ХО



6.2.1. Эквивалентная схема

ЧТОБЫ ПОНЯТЬ
ПРИЧИНУ, СНАЧАЛА
ПОСТРОИМ
ЭКВИВАЛЕНТНУЮ
СХЕМУ...

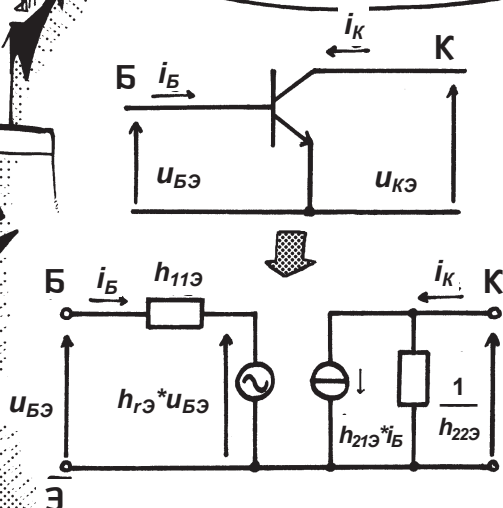
...И ОПРЕДЕЛИМ
КОЭФФИЦИЕНТ
УСИЛЕНИЯ ПО ТОКУ
И ВЫХОДНОЙ
ИМПЕДАНС!

ЧТО?

А ЧТО ТАКОЕ
«ЭКВИВАЛЕНТНАЯ
СХЕМА»?

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ
СХЕМА...

...ЭТО СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЦЕПИ, КОТОРАЯ ПОЛУЧИТСЯ,
ЕСЛИ ЗАМЕНИТЬ ТРАНЗИСТОР
НА СОПРОТИВЛЕНИЯ (R),
КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ (L),
КОНДЕНСАТОРЫ (C),
ИДЕАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ
НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА.



А ЗАЧЕМ ЭТО
НАДО?...

ПРОСТО ТРАНЗИСТОР
СЛИШКОМ ЗАТРУДНЯЕТ
АНАЛИЗ СХЕМЫ.
ВОТ ЗАЧЕМ...

6.2.2. Цепь смещения



И ВПРАВАУ, СТАЛО НАМНОГО ПОНЯТНЕЕ!

Выделяем из схемы цепь постоянного тока

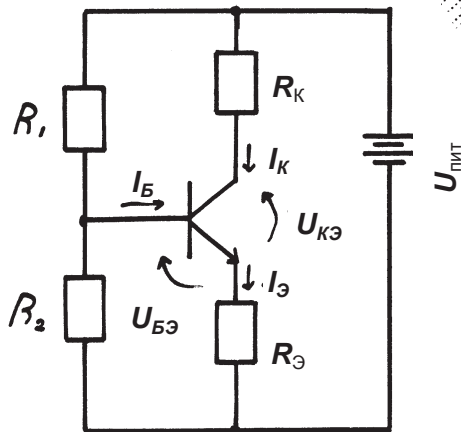


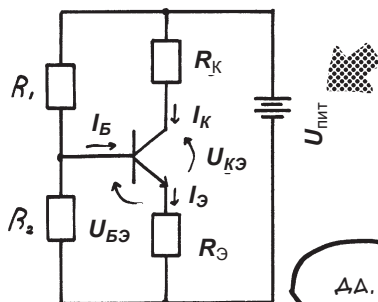
Рис. 6-2 Цепь смещения усилителя с общим эмиттером

ТАКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ВЫДЕЛЕННАЯ ИЗ ОБЩЕЙ СХЕМЫ, НАЗЫВАЕТСЯ «ЦЕПЬЮ СМЕЩЕНИЯ».

ПРИ ЭТОМ МЫ УЧЛИ, ЧТО ИМПЕДАНСЫ КОНДЕНСАТОРОВ НА РИС. 6-1 ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА РАВНЫ БЕСКОНЕЧНОСТИ.

ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ВЕТВИ С КОНДЕНСАТОРАМИ МОЖНО РАЗОРВАТЬ, ТАК?!

ВЗГЛЯНУВ НА ЭТУ ЦЕПЬ
СМЕЩЕНИЯ, МОЖНО
УВИДЕТЬ ЧТО ИСТОЧНИК
ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО
ТОКА ЗДЕСЬ ТОЛЬКО
ОДИН.



АА.

ПОЭТОМУ

МЫ ДЕЛИМ НАПРЯЖЕНИЕ
ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С
ПОМОЩЬЮ СОПРОТИВЛЕНИЙ
 R_1 И R_2 ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ
ТРАНЗИСТОР БЫЛ
ПОСТОЯННО ОТКРЫТ.

ЕСЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ЗДЕСЬ ПРАВИЛО
КИРХГОФА,

$$U_{\text{пит.}} \approx R_k \cdot I_k + U_{\text{кэ}} + R_{\text{э}} \cdot I_{\text{э}}$$

ТО ВОТ ЧТО
ПОЛУЧИТСЯ.

КРОМЕ
ТОГО,

ЕСЛИ СЧИТАТЬ, ЧТО
ПОДАВЛЯЮЩЕЕ БОЛЬШИНСТВО
ЭЛЕКТРОНОВ, ВХОДЯЩИХ В
КОЛЛЕКТОР ИЗ ПРОВОДА,
ДОСТИГАЮТ ЭМИТТЕРА, ТО
МОЖНО ПОЛОЖИТЬ $I_k \approx I_{\text{э}}$,
СЛЕДОВАТЕЛЬНО:

$$U_{\text{пит.}} \approx U_{\text{кэ}} + (R_k + R_{\text{э}}) \cdot I_k$$

АА,
ПОЛУЧАЕТСЯ ТАК!

«Что такое рабочие точки»

СЕЙЧАС
С ПОМОЩЬЮ ТОЛЬКО
ЧТО ПОЛУЧЕННОЙ
ФОРМУЛЫ,

$$U_{\text{пит}} \approx U_{\text{кэ}} + (R_{\text{к}} + R_{\text{э}}) \cdot I_{\text{к}}$$

МЫ НАЧЕРТИМ
ГРАФИК СТАТИЧЕСКОЙ
НАГРУЗОЧНОЙ ПРЯМОЙ
(НАГРУЗОЧНОЙ ПРЯМОЙ
ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТО-
КА), ТО ЕСТЬ ГРАФИК
ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОЛЛЕКТОРНОГО ТОКА $I_{\text{к}}$
ОТ КОЛЛЕКТОРНОГО НА-
ПРЯЖЕНИЯ $U_{\text{кэ}}$.

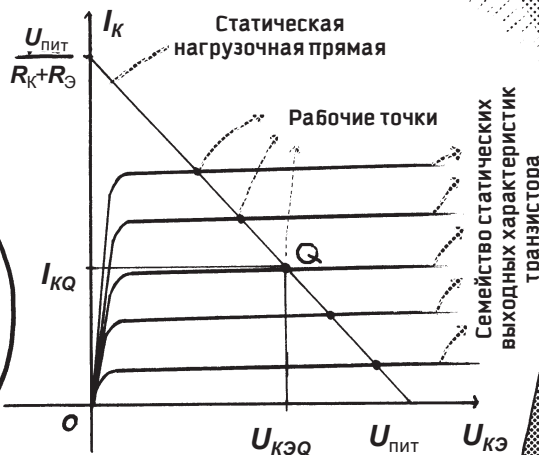
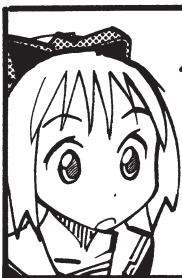
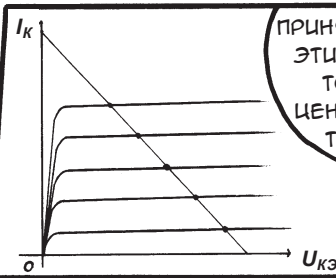


Рис. 6-3 Статическая нагрузочная прямая



КРОМЕ ТОГО, НА РИСУНКЕ ТАКЖЕ
ПОКАЗАНЫ КРИВЫЕ СТАТИЧЕСКИХ
ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНЗИСТОРА. А ТОЧКИ ПЕРЕСЕ-
ЧЕНИЯ ЭТИХ КРИВЫХ С НАГРУ-
ЗОЧНОЙ ПРЯМОЙ НАЗЫВАЮТСЯ
«РАБОЧИМИ ТОЧКАМИ».

НА РИСУНКЕ У НАС ИХ ЦЕЛЫХ ПЯТЬ!



ПРИНЯВ ОДНУ ИЗ
ЭТИХ РАБОЧИХ
ТОЧЕК ЗА
ЦЕНТРАЛЬНУЮ
ТОЧКУ, МЫ...



ЭТО ПОЗВОЛИТ
НАМ ДОБИТЬСЯ
УСИЛЕНИЯ.

ВОТ КАК!
ПОНЯТНО!



<Оптимальная рабочая точка>

РАБОЧУЮ ТОЧКУ Q НУЖНО ВЫБИРАТЬ ОСТОРОЖНО.

ПРАВДА?

ЕСЛИ РАБОЧАЯ ТОЧКА РАСПОЛОЖЕНА БЛИЗКО К КРАЮ, ТО ИСКАЖИТСЯ ЧАСТЬ ВОЛНЫ, ВЫХОДЯЩАЯ ЗА ПРЕДЕЛЫ НАГРУЗОЧНОЙ ПРЯМОЙ.

ЭТА ОПТИМАЛЬНАЯ РАБОЧАЯ ТОЧКА Q РАССЧИТЫВАЕТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ ФОРМУЛАМ.

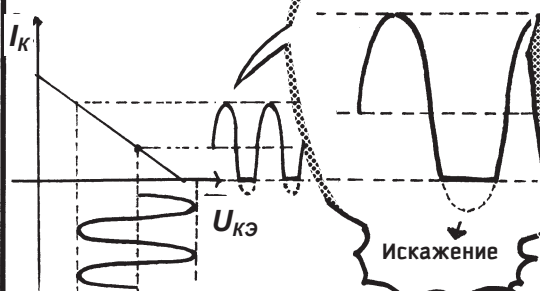


Рис. 6-4 График усиленного сигнала в случае искажений

$$U_{KЭQ} = \frac{1}{2} U_{пит}$$

$$I_{KQ} = \frac{\frac{1}{2} U_{пит}}{(R_K + R_э)}$$

ПОЭТОМУ

НЕОБХОДИМО ВЫБРАТЬ ПО ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМАЛЬНУЮ РАБОЧУЮ ТОЧКУ, КАК ПОКАЗАНО НА РИС. 6-5.

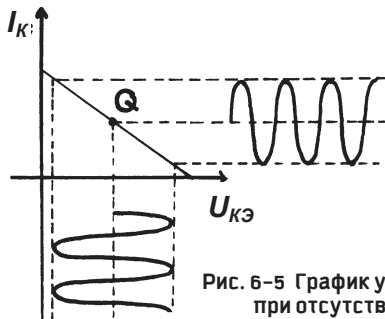
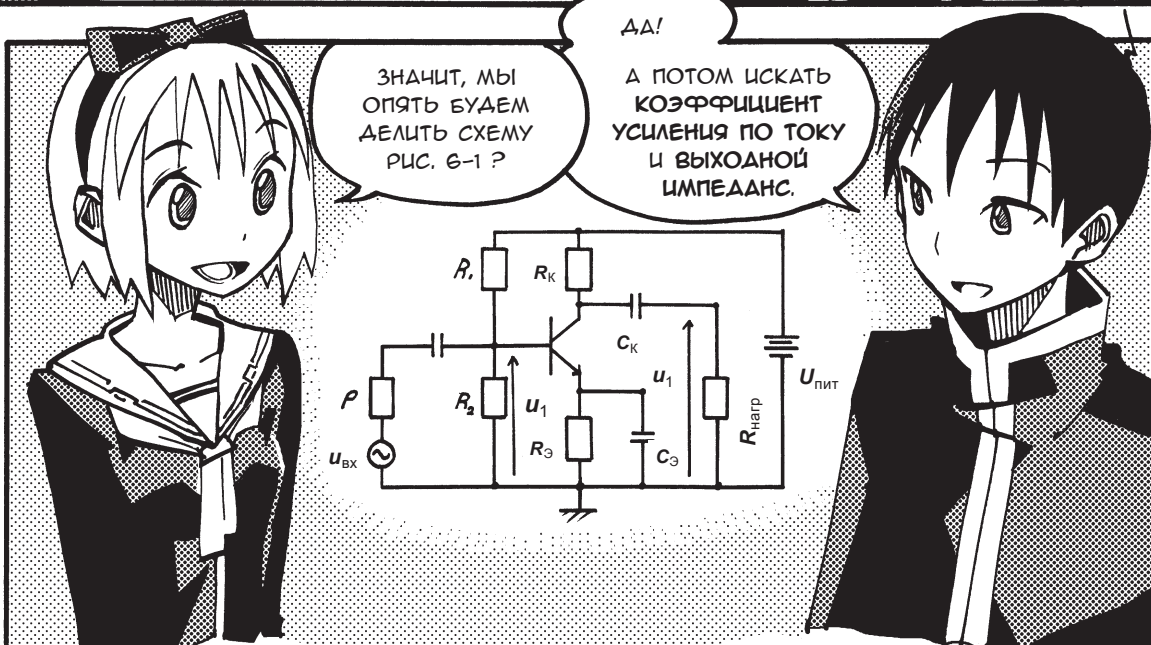


Рис. 6-5 График усиленного сигнала при отсутствии искажений



6.2.3. Схема усиления переменного тока

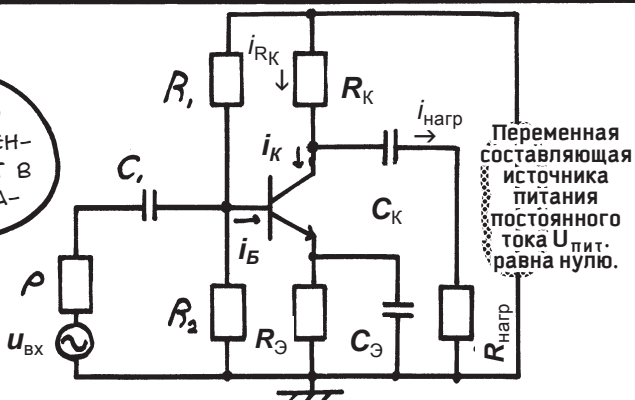


«Эквивалентная схема для переменного тока»



ЭКВИВАЛЕНТУ СХЕМУ ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТРОЯТ В ТАКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.

Рис. 6-6



(1.) ТАК КАК ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕ СОЗДАЁТ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ, МЫ ЕГО ЗАКОРАЧИВАЕМ.

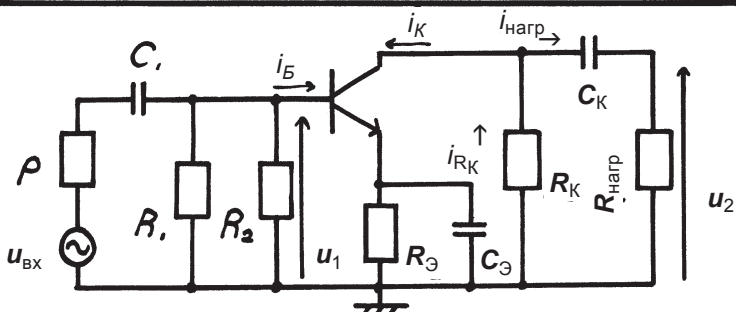


Рис. 6-7

(2.) ТАК КАК ПОТЕНЦИАЛЫ ВЕРХНИХ ВЫВОДОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ R_1 И R_K РАВНЫ ПОТЕНЦИАЛУ «ЗЕМЛИ», МОЖНО ПЕРЕЧЕРТИТЬ СХЕМУ ВОТ ТАК.

(3.) ЕСЛИ СЧИТАТЬ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШИМИ, ТО ИХ ТОЖЕ МОЖНО ЗАКОРОТИТЬ.

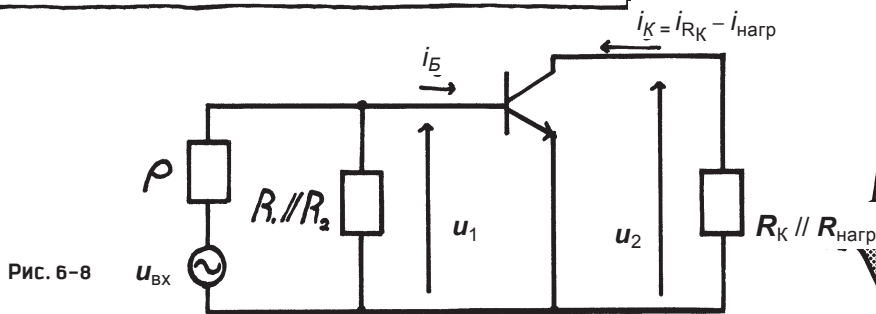
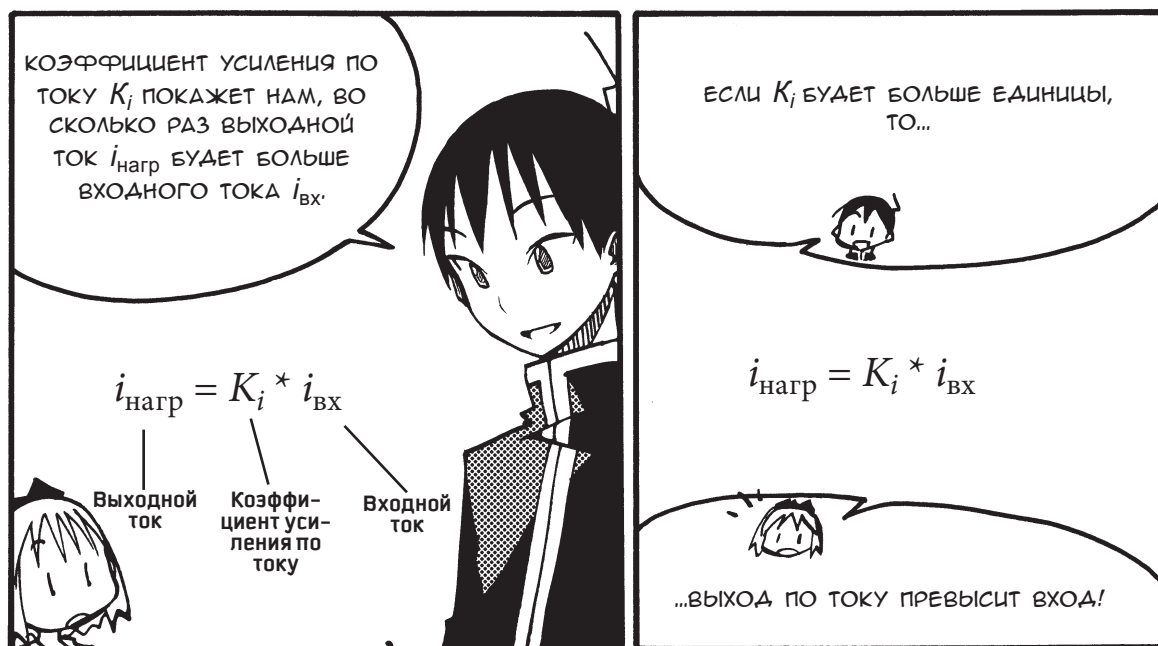
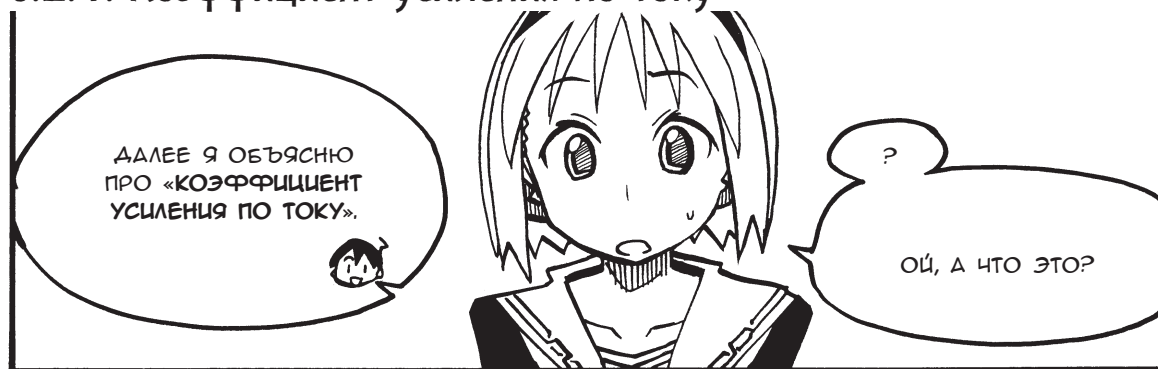


Рис. 6-8





6.2.4. Коэффициент усиления по току



ДАЛЕЕ Я БУДУ
ОБЪЯСНЯТЬ, В ЧЁМ
ЗАЕСЬ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ
ПРИНЦИП...

ДАВАЙ!

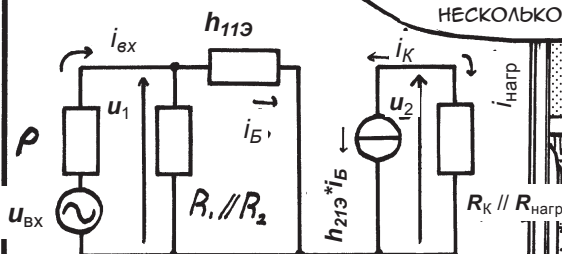
...ДЛЯ ЭТОГО НУЖНО С
ПОМОЩЬЮ СХЕМЫ РИС. 6-9
НАЙТИ СВЯЗЬ МЕЖДУ
ВХОДНЫМ ТОКОМ $i_{вх}$ И
ВЫХОДНЫМ ТОКОМ $i_{нагр}$!

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ
ПО ТОКУ K_i ВЫРАЖАЕТСЯ
КАК ОТНОШЕНИЕ ВЫХОДНО-
ГО ТОКА $i_{нагр}$ К ВХОДНОМУ
ТОКУ $i_{вх}$

$$K_i = \frac{i_{нагр}}{i_{вх}} =$$

$$= \left(\frac{i_B}{i_{вх}} \right) \cdot \left(\frac{i_K}{i_B} \right) \cdot \left(\frac{i_{нагр}}{i_K} \right)$$

ТОК, ТЕКУЩИЙ ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ
 $R_1 // R_2$ ОЧЕНЬ МАЛ ПО СРАВНЕНИЮ С
ТОКОМ, ТЕКУЩИМ ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕ-
НИЕ h_{113} . ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ОБЫЧНО
СОПРОТИВЛЕНИЕ $R_1 // R_2$ СОСТАВЛЯЕТ
НЕСКОЛЬКО КИЛОМ...



ПОЭТОМУ МОЖНО
СЧИТАТЬ, ЧТО

$$i_B \approx i_{вх}$$

$$i_{нагр} \approx -i_K = -h_{213} \cdot i_B$$

...А

СОПРОТИВЛЕНИЕ h_{113} - ВСЕГО НЕ-
СКОЛЬКО ДЕСЯТКОВ ОМ, ПОЭТОМУ
БОЛЬШАЯ ЧАСТЬ ТОКА, СОЗДАВАЕ-
МОГО ИСТОЧНИКОМ $U_{вх}$ ПОЙДЁТ
ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ h_{113} .

...А ЗНАЧИТ,
 $K_i = -h_{213} \cdot i_B$

ДАЛЕЕ, h_{213} ...

$$h_{213} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

...ВЫЧИСЛЯЕТСЯ ВОТ
ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ.



<Инверсия фазы>

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ТАК
КАК ВЫХОДНОЙ ТОК
БОЛЬШЕ ВХОДНОГО,
МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО
ДОСТИГАЕТСЯ
ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ.

ясно!

ОЙ, КАК Я СРАЗУ НЕ ЗА-
МЕТИЛА! ЗНАЧЕНИЕ КОЭФ-
ФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ПО
ТОКУ K_i – МЕНЬШЕ НУЛЯ?!
НИЧЕГО НЕ ПОНИМАЮ!!

...
КРОМЕ ТОГО, K_i ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ,
ТАК КАК ФАЗА ТОКА В НАГРУЗКЕ
ПРОТИВОПОЛОЖНА ФАЗЕ
ВХОДНОГО ТОКА.

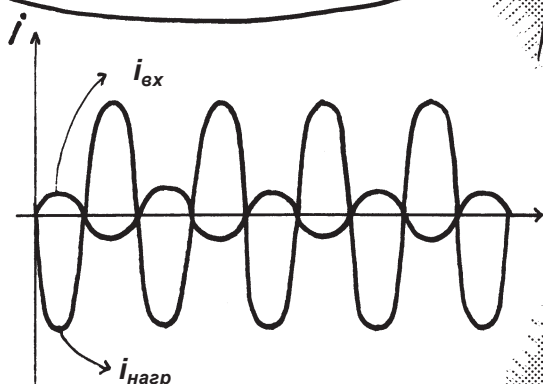


Рис. 6-10 Инверсия фазы

МОЖЕТ БЫТЬ, И У НАС
С ТОБОЙ ФАЗЫ
ПРОТИВОПОЛОЖНЫ.

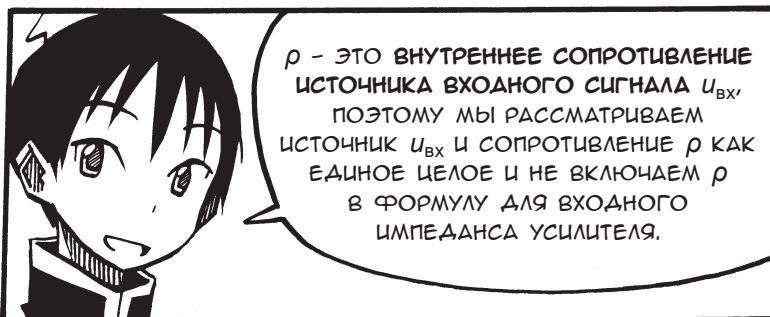
ЧТО ТЫ
ДЕЛАЕШЬ, ДЯ?

ГРУСТНО...

6.2.5. Входной и выходной импедансы (1)



<Входной импеданс $Z_{вх}$ (1)>





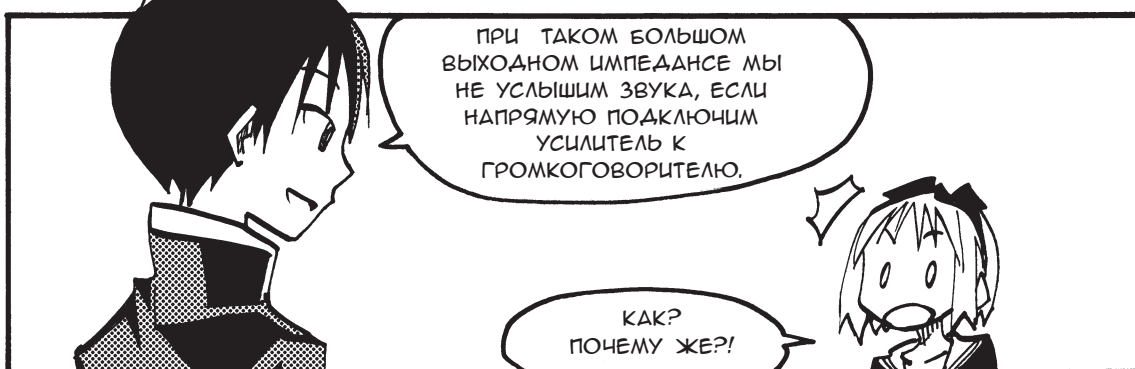
$Z_{\text{вых}}$ - ЭТО ИМПЕДАНС, КОТОРЫЙ МЫ ИЗМЕРЯЕМ СО СТОРОНЫ ВЫХОДНЫХ ЗАЖИМОВ $R_{\text{нагр}}$. ВО ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЕ ВХОДНОГО СИГНАЛА $U_{\text{вх}}$ ДОЛЖНО БЫТЬ РАВНО НУЛЮ.

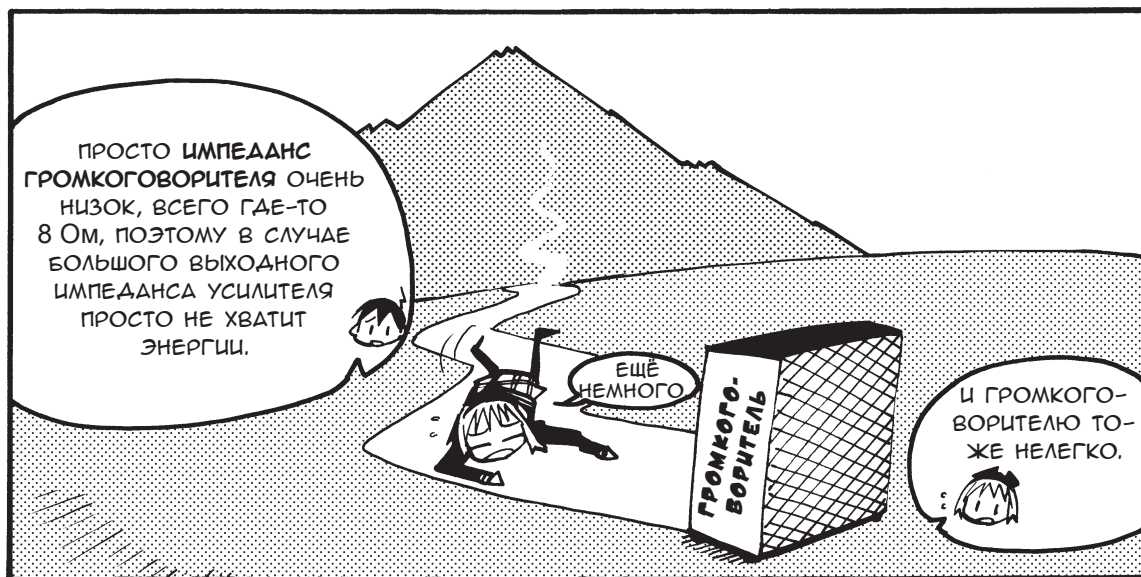
$U_{\text{вх}} = 0$ ОЗНАЧАЕТ, ЧТО $i_B = 0$

ТО ЕСТЬ СО СТОРОНЫ ВХОДНЫХ ЗАЖИМОВ НЕ БУДЕТ ТОКА? ЗНАЧИТ...

ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС РАССЧИТЫВАЕТСЯ ТАК!

ПОЭТОМУ ТОК УПРАВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ТОКА ТОЖЕ РАВЕН НУЛЮ: $-h_{213} \cdot i_B = 0$ ($= i_K$).

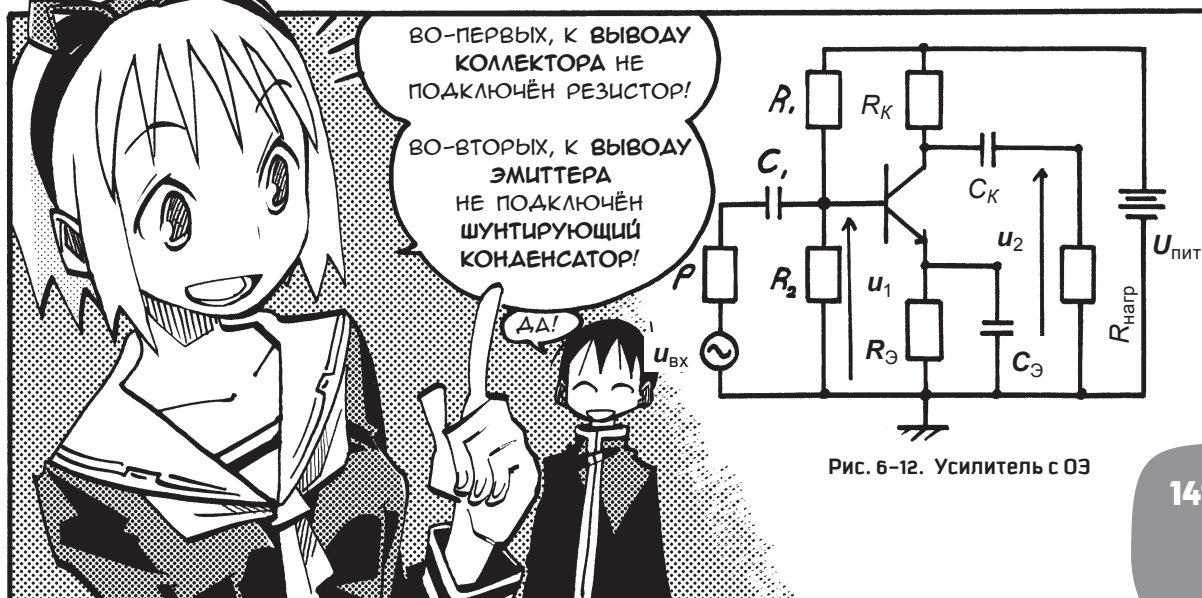
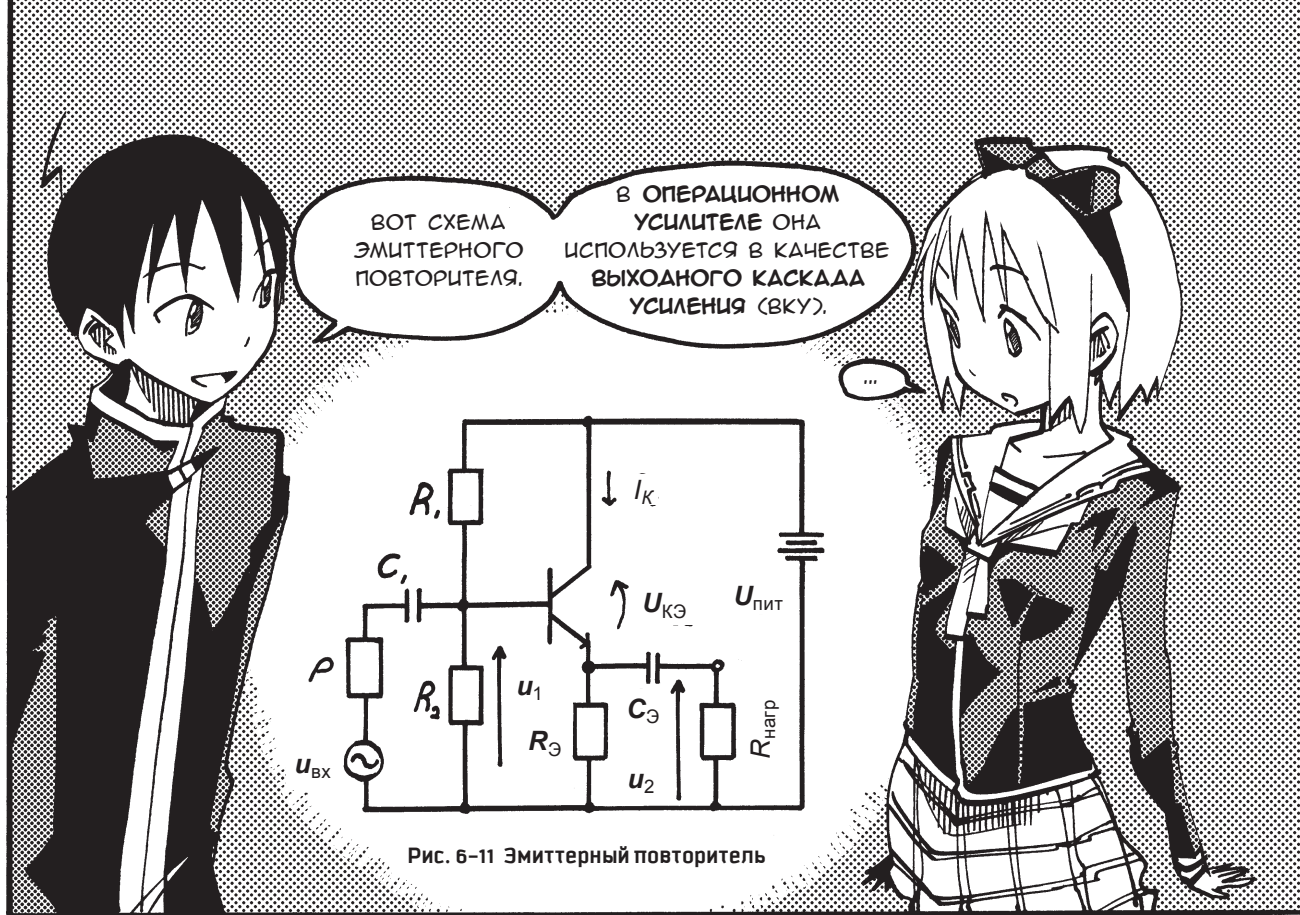
$$Z_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{внеш}}}{i_{\text{вых}}} \bigg|_{U_{\text{вх}}=0} = \infty$$




6.3. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

6.3.1. Эмиттерный повторитель





6.3.2. Расчёт цепи смещения

РАССЧИТАЕМ ЦЕПЬ
СМЕЩЕНИЯ И ДЛЯ
ЭМИТТЕРНОГО
ПОВТОРИТЕЛЯ.

СЛИШКОМ БЛИЗКО!

ТО ЕСТЬ, ЦЕПЬ ДЛЯ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ПОСТОЯННОГО
ТОКА, ДА?!

ЦЕПЬ СМЕЩЕНИЯ ДЛЯ СХЕМЫ РИС. 6-11
БУДЕТ ТАКОЙ!

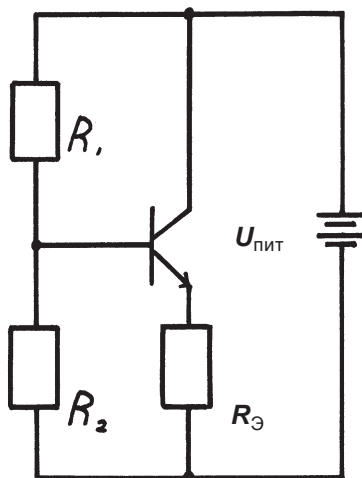
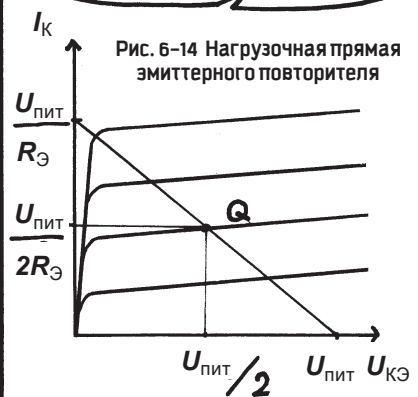


Рис. 6-13 Схема эмиттерного повторителя
для постоянного тока

ВОТ НАГРУЗОЧНАЯ ПРЯМАЯ
ДЛЯ ВЫБОРА РАБОЧЕЙ ТОЧКИ
ПО СХЕМЕ РИС. 6-13

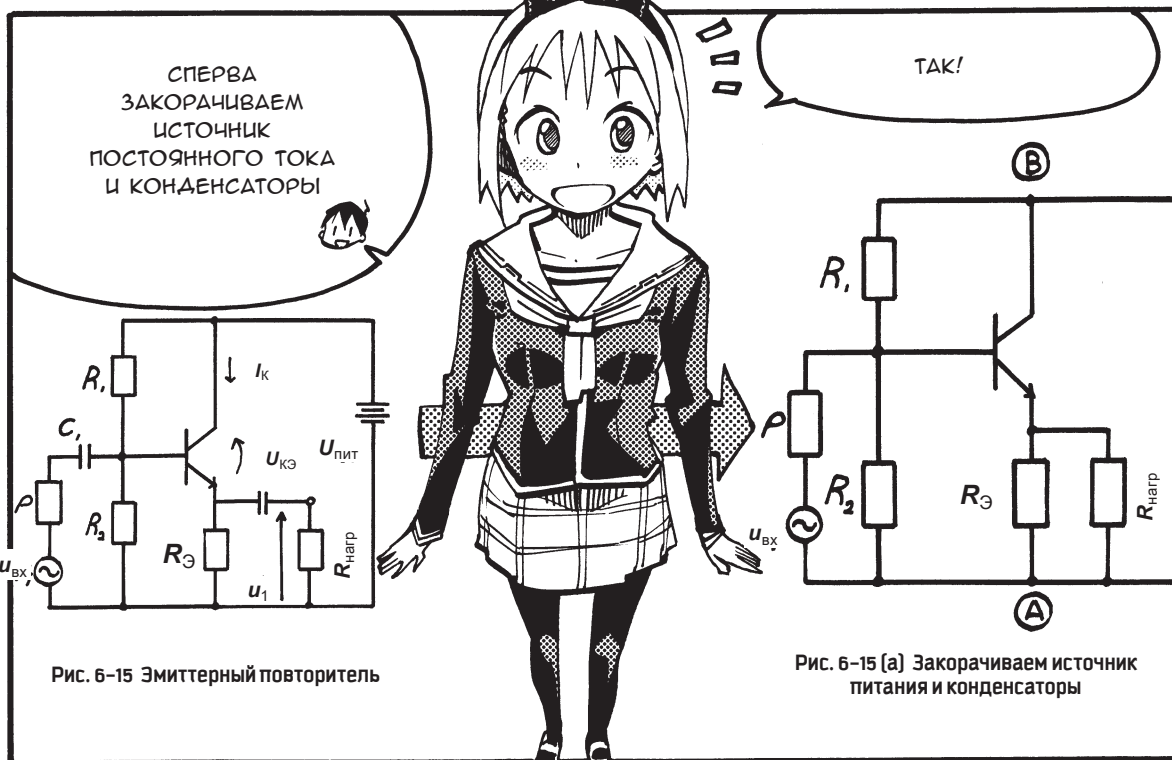


ЗНАЧИТ,
ОПТИМАЛЬНАЯ
РАБОЧАЯ ТОЧКА Q
ДЛЯ ЭТОЙ СХЕМЫ...

$$U_{кэQ} = \frac{U_{пит}}{2}; \quad I_{кQ} = \frac{U_{пит}}{2R_э}$$

...НАХОДИТСЯ
ВОТ ТАК!

6.3.3. Эквивалентная схема для переменного тока



ТАК КАК ПОТЕНЦИАЛЫ
УЗЛОВ А И В ОДИНАКОВЫ,
СХЕМУ МОЖНО
ПЕРЕЧЕРТИТЬ ВОТ ТАК.

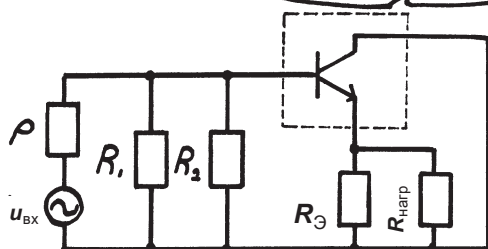


Рис. 6-15 (б)

КРОМЕ ТОГО,
ЧАСТЬ СХЕМЫ,
ОБВЕДЕННУЮ НА
РИС. 6-15(б) ШТРИ-
ХОВОЙ ЛИНИЕЙ,

...ТО ЕСТЬ ТРАНЗИСТОР,
МЫ ЗАМЕНИМ НА ЭКВИ-
ВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ С
h-ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ
ПОДКЛЮЧЕНИЯ С ОБ-
ЩИМ ЭМИТТЕРОМ.

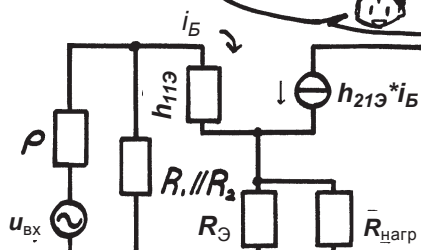


Рис. 6-15 (в)

НО ЭТА СХЕМА
КАКАЯ-ТО
СЛИШКОМ
СЛОЖНАЯ...

ДА...
ПОЭТОМУ ДАВАЙ
ПЕРЕЧЕРТИМ ЕЁ
ТАК,...

...ЧТОБЫ СОПРО-
ТИВЛЕНИЕ
НАГРУЗКИ $R_{нагр}$
ОКАЗАЛОСЬ НА
ПРАВОМ КРАЮ
СХЕМЫ.

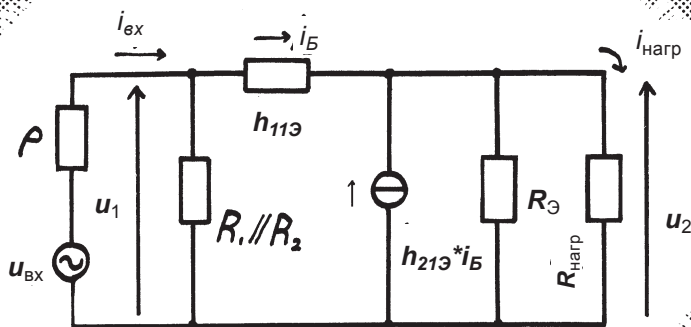


Рис. 6-15 (г)

СТАЛО НАМНОГО ПРОЩЕ!



СХЕМА РИС. 6-15 (Г) СОДЕРЖИТ ИСТОЧНИК ТОКА ($h_{21э} \cdot i_B$) ①, ПОЭТОМУ СУММАРНЫЙ ТОК ЧЕРЕЗ ВЕТВИ $R_3 \parallel R_{нагр}$ ② БУДЕТ РАВЕН $i_B \cdot (1 + h_{21э})$.

ДА...

МЫ МОЖЕМ УБРАТЬ ИЗ ЭТОЙ СХЕМЫ ВЕТВЬ С ИСТОЧНИКОМ ТОКА. ЧТОБЫ ПРИ ЭТОМ ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ u_2 НЕ ИЗМЕНИЛОСЬ, НУЖНО ПРОСТО ДОМНОЖИТЬ СОПРОТИВЛЕНИЕ $R_3 \parallel R_{нагр}$ НА КОЭФФИЦИЕНТ $(1 + h_{21э})$.

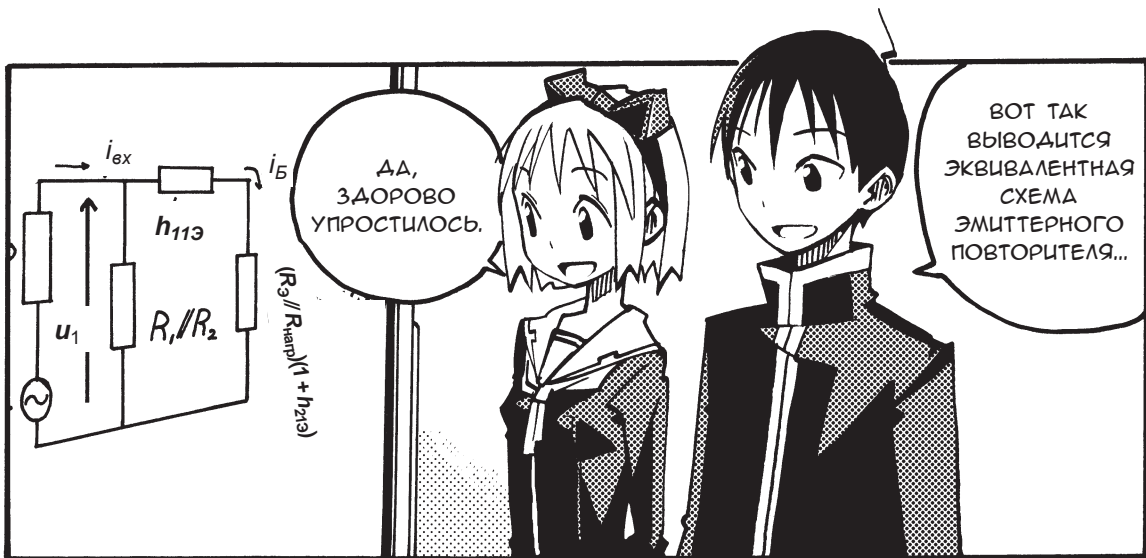
Рис. 6-15 [д]

ЭТО, В ОЩЕМ.... ЧТО ОЗНАЧАЕТ?

ЕСЛИ ПРЕДПОЛОЖИТЬ, ЧТО ЧЕРЕЗ $R_3 \parallel R_{нагр} \cdot (1 + h_{21э})$ ТЕЧЕТ ТОК i_B ...

...ТО ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА УПРОСТИТСЯ ВОТ ТАК.

Рис. 6-15 [е]



6.3.4. Коэффициенты усиления по напряжению и току

«Коэффициент усиления по напряжению»

НО В СЛУЧАЕ ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ СПЕРВА ПРИДЁТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ ТАКЖЕ «КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ».

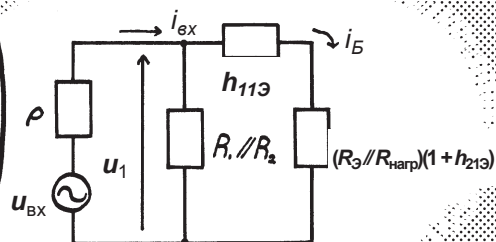
ТЕПЕРЬ ДАВАЙ
НАЙДЁМ
КОЭФФИЦИЕНТ
УСИЛЕНИЯ ПО
ТОКУ.

ДАВАЙ.

АА-А-А?...

ЕСЛИ В СХЕМЕ РИС. 6-15 (Б),
ЗА ВХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ
ПРИНЯТЬ u_1 , А ЗА
ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ
ПРИНЯТЬ u_2 , ТО ЕСТЬ
ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ
НА СОПРОТИВЛЕНИИ
 $(R_3 // R_{\text{нагр}}) (1 + h_{213})$,

ТО КОЭФФИЦИЕНТ
УСИЛЕНИЯ
ПО НАПРЯЖЕНИЮ...



$$K_u = \frac{u_2}{u_1}$$

БУДЕТ ВОТ ТАКИМ!

СЛЕДОВАТЕЛЬНО,
НАПРЯЖЕНИЕ ВЫХОДНОГО
СИГНАЛА БУДЕТ ТАКИМ ЖЕ,
КАК НАПРЯЖЕНИЕ
ВХОДНОГО.

АА?...

<Коэффициент усиления по току>

КАК ТЫ ПОМНИШЬ, КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ПО ТОКУ K_i РАВЕН ОТНОШЕНИЮ ТОКА $i_{нагр}$, ТЕКУЩЕГО ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ НАГРУЗКИ $R_{нагр}$, К ВХОДНОМУ ТОКУ $i_{вх}$.

ДА!
УЖ ЭТО Я ЗАПОМНИЛА...

ЗНАЧИТ,
КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ
ПО ТОКУ В ЭМИТТЕРНОМ
ПОВТОРИТЕЛЕ...

$$K_i = \frac{i_{нагр}}{i_{вх}} \approx 1 + h_{21Э}$$

...БУДЕТ ВОТ
ТАКИМ!

ТАК КАК ЗНАЧЕНИЕ $h_{21Э}$
СОСТАВЛЯЕТ ПРИМЕРНО 50-100,
МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ВЫХОДНОЙ
СИГНАЛ С ТОКОМ, В 50-100 РАЗ
ПРЕВЫШАЮЩИМ ТОК ВХОДНОГО
СИГНАЛА.

...

ПОНЯТНО!

ПОЭТОМУ «УСИЛЕНИЕ» ПО ТОКУ БУДЕТ!

ТАК!

6.3.5. Входной и выходной импедансы (2)

<Входной импеданс $Z_{вх}$ (2)>

ТЕПЕРЬ,
НАПОСЛЕДОК...

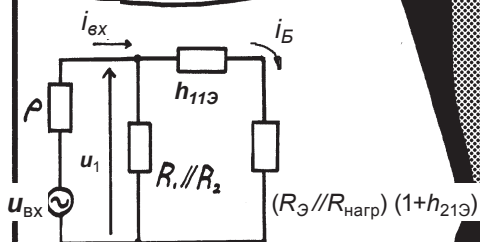
ИМПЕДАНС!

НЕ ТАК ЛИ?

ДЛЯ НАЧАЛА -
ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС!

АА!

ТАК КАК ВХОДНОЙ
ИМПЕДАНС $Z_{вх}$ РАВЕН
ИМПЕДАНСУ, ИЗМЕРЕННОМУ
СО СТОРОНЫ ВХОДА
СХЕМЫ НА РИС. 6-15(Г)...



$$\left(\frac{u_1}{i_{вх}} \approx \frac{u_1}{i_Б} \right)$$

(ТАК КАК СОПРОТИВЛЕНИЕ $R_1 // R_2$
СРАВНИТЕЛЬНО ВЕЛИКО, МОЖНО
ПРЕНЕБРЕЖЬ ТОКОМ, ТЕКУЩИМ
ЧЕРЕЗ НЕГО)

$$Z_{вх} \approx h_{11э} + (1 + h_{21э}) \cdot (R_3 // R_{нагр})$$

...ОН БУДЕТ ПРИМЕРНО
ТАКИМ. ЗНАЧИТ МОЖНО
СКАЗАТЬ, ЧТО ОН ГДЕ-
ТО В 100 РАЗ БОЛЬШЕ,
ЧЕМ $(R_3 // R_{нагр})$.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, МОЖНО
СКАЗАТЬ, ЧТО ЭТА СХЕМА
ХОРОШО ПОДХОДИТ ДЛЯ
ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ВЫХОДНЫМ
ЗАЖИМАМ, НАПРИМЕР,
УСИЛИТЕЛЯ С ОБЩИМ
ЭМИТТЕРОМ, ИЛИ УСИЛИТЕЛЯ
С ОБЩЕЙ БАЗОЙ.

1Э, 1Э,

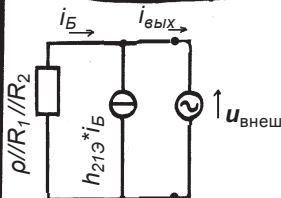
1Э

<Выходной импеданс $Z_{\text{вых}}$ (2)>

ТЕПЕРЬ ВЫХОДНОЙ
ИМПЕДАНС!

Oh YEAN!

ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС $Z_{\text{вых}}$
ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ
ВЫЧИСЛЯЕТСЯ ПО ТОЙ ЖЕ МЕ-
ТОДИКЕ, КАК ДЛЯ УСИЛИТЕЛЯ
С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ.



ЗДЕСЬ МЫ ПРЕНЕБРЕГАЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ПОДКЛЮЧЁННЫМ h_{113} , ТАК КАК ОНО ОЧЕНЬ МАЛО, И ПАРАЛЛЕЛЬНО ПОДКЛЮЧЁННЫМ R_3 , ТАК КАК ОНО ОЧЕНЬ ВЕЛИКО.

$$i_{\text{вых}} = i_B + h_{213} \cdot i_B = i_B (1 + h_{213})$$

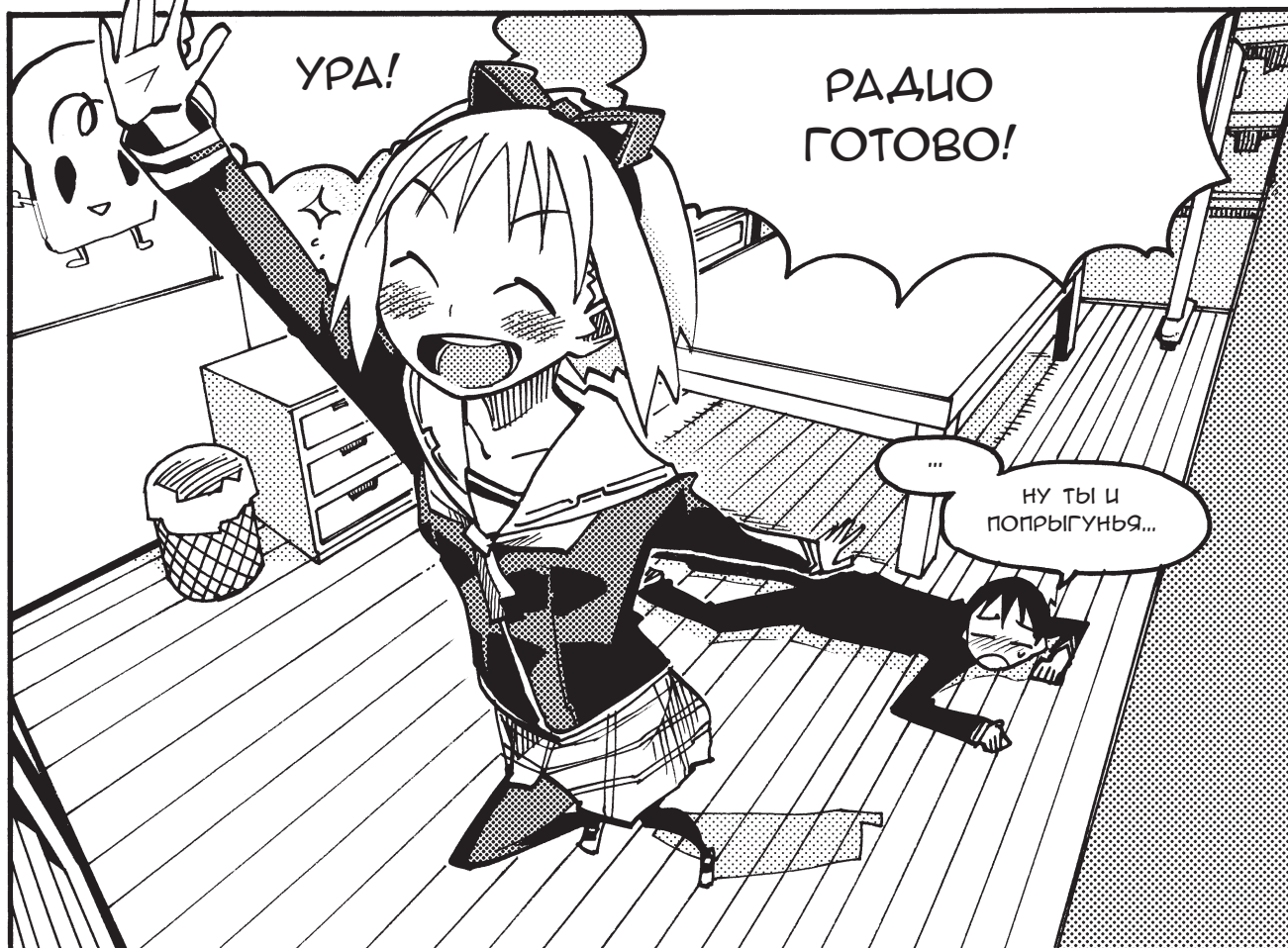
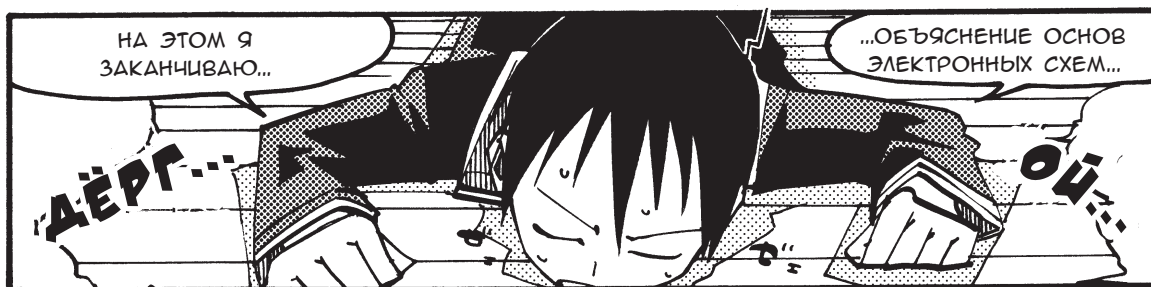
ТАК КАК $i_B = 0$ НЕ БУДЕТ ВЫПОЛНЯТЬСЯ ДАЖЕ ПРИ $u_{\text{вх}} = 0$, ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС $Z_{\text{вых}}$ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШИМ.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ВОТ
ЧТО ПОЛУЧИТСЯ!

$$\begin{aligned} Z_{\text{вых}} &= \frac{u_{\text{внеш}}}{i_{\text{вых}}} = \frac{i_B \cdot (\rho // R_1 // R_2)}{i_B \cdot (1 + h_{213})} = \\ &= \frac{(\rho // R_1 // R_2)}{(1 + h_{213})} \approx h_{11Б} \end{aligned}$$

ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС
 $Z_{\text{вых}}$ ЭМИТТЕРНОГО
ПОВТОРИТЕЛЯ БУДЕТ
МЕНЬШЕ, ЧЕМ ВЫХОДНОЙ
ИМПЕДАНС УСИЛИТЕЛЯ С
ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ...

ooo



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

❏ Связь с децибелами (дБ)

Кстати, коэффициент усиления по току в схеме усилителя с общим эмиттером,



ИНОГДА ВЫРАЖАЕТСЯ
ВОТ ТАК

$$K_i = 20 \lg \left| \frac{i_{\text{нагр}}}{i_{\text{вх}}} \right|$$

В этом случае он выражается в децибелах (дБ). Децибел – это единица измерения, которая используется также для выражения таких величин, как отношение сигнал/шум, сила звука и т. п.

Например, при 0 дБ входной и выходной сигналы одинаковы по величине, при 20 дБ выходной сигнал в 10 раз, при 40 дБ – в 100 раз превышает входной.

Следовательно, основополагающая схема усилителя с общим эмиттером, если считать $h_{21Э}$ равным 100, обеспечивает усиление в 40 дБ.

❏ Зачем нужен эмиттерный повторитель?

Причина заключается в том, что мощность, которую усилитель с общим эмиттером отдаёт в нагрузку, выражается формулой $P = I^2 \cdot R$.

Другими словами, это можно представить в виде схемы на стр. 160 с последовательным подключением выходного импеданса $Z_{\text{вых}}$ и сопротивления нагрузки $R_{\text{нагр}}$. При этом сопротивление нагрузки $R_{\text{нагр}}$, которое соответствует громкоговори-телю, очень мало по сравнению с выходным импедансом $Z_{\text{вых}}$, и если считать, что через громкоговоритель и выходной импеданс течёт один и тот же ток, то мощность, потребляемая громкоговорителем, окажется намного меньше мощности, расходуемой на выходном импедансе. В результате в громкоговоритель почти не будет поступать энергия, которая должна преобразовываться в звук.

Другими словами, вся энергия усилителя будет расходоваться на выходном импедансе, а не на громкоговори-теле, в результате чего потребляемая громкоговори-телем электрическая мощность, которая является источником энергии звука, практически исчезнет.

Следовательно, звука в громкоговори-теле не будет, поэтому одним усилителем с ОЭ обойтись не удастся.

Кстати, величина импеданса громкоговорителя обычно равна 8 Ом, а выходной импеданс усилителя с ОЭ на практике принимается равным 300 кОм.

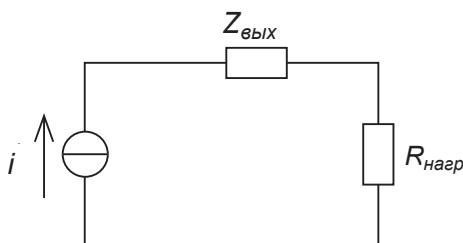


Рис. 6-A1 Выходной импеданс $Z_{вых}$ и сопротивление нагрузки $R_{нагр}$.

Что произойдёт при каскадном включении эмиттерного повторителя?

Если соединить усилитель с общим эмиттером и эмиттерный повторитель так, как показано на рис. 6-A2, то общий коэффициент усиления по току будет равен произведению **коэффициента усиления по току** усилителя с ОЭ и коэффициента усиления по току эмиттерного повторителя. Поэтому даже если считать, что каждый из этих коэффициентов усиления составляет примерно 100, их перемножение даст 10 000, что является очень большим значением.



Рис. 6-A2 Каскадирование усилителя с ОЭ и эмиттерного повторителя

Каскадирование усилителей

В этой главе рассказывалось о каскадировании усилителя с **общим эмиттером** и **эмиттерного повторителя**.

Здесь я объясню, какими будут **коэффициент усиления по напряжению**, **входной импеданс**, **выходной импеданс** двухкаскадного усилителя.

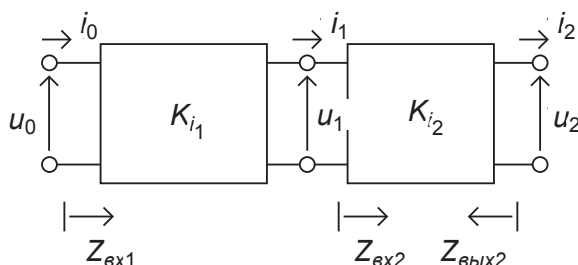


Рис. 6-А3 Представление о каскадировании усилителей

Для случая, показанного на рис. 6-А3, коэффициент усиления по току можно выразить как

$$K_i = \frac{i_2}{i_0} = \frac{i_1}{i_0} \cdot \frac{i_2}{i_1} = K_{i1} \cdot K_{i2},$$

то есть в виде произведения коэффициентов усиления первого и второго каскадов усиления.

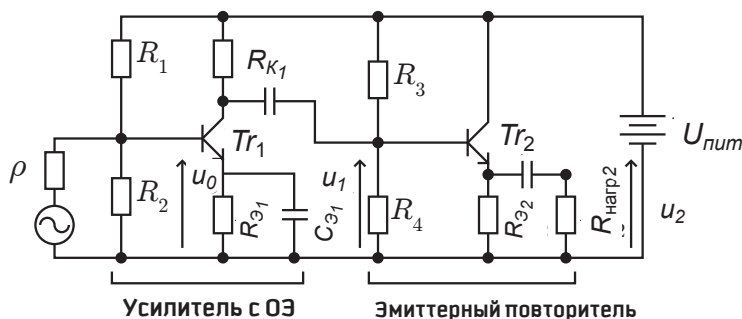


Рис. 6-А4 Каскадирование усилителя с ОЭ и эмиттерного повторителя

Следовательно, при каскадировании усилителя с ОЭ и эмиттерного повторителя, как на рис. 6-А4 будет выполняться, хотя и приближённо, следующее соотношение:

Коэффициент усиления по напряжению в каскадной схеме =
= Коэффициент усиления по напряжению усилителя с ОЭ ×
× Коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя

Здесь слово «приближённо» указывает на взаимовлияние каскадов через **входной импеданс**, **выходной импеданс** и **сопротивление цепи смещения**, которые являются ненулевыми конечными величинами.

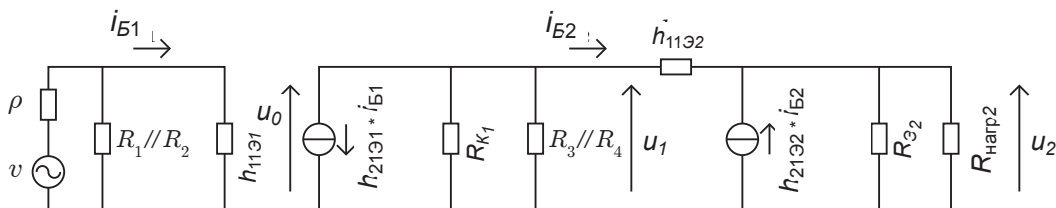


Рис. 6-А5 Эквивалентная схема переменного тока для схемы рис. 6-А4

Рассмотрим часть каскадной схемы, соответствующую усилителю с ОЭ. Если принять входной импеданс эмиттерного повторителя равным $Z_{\text{вх}2}$, то для коэффициента усиления по току после первого каскада – усилителя с ОЭ, мы получим следующее:

$$i_0 = i_{\text{Б}1}$$

$$i_1 = i_{\text{Б}2} = -h_{21\text{Э}1} \cdot i_{\text{Б}1} \cdot \frac{R_{\text{К}1} // R_3 // R_4}{R_{\text{К}1} // R_3 // R_4 + Z_{\text{вх}2}}$$

$$K_{i1} = \frac{i_1}{i_0} = -h_{21\text{Э}1} \cdot \frac{R_{\text{К}1} // R_3 // R_4}{R_{\text{К}1} // R_3 // R_4 + Z_{\text{вх}2}}$$

Таким образом, при каскадном подключении K_{i1} не будет строго равен значению, найденному для усилителя с ОЭ.

Однако том в случае, если $R_{\text{К}1} // R_3 // R_4 \gg Z_{\text{вх}2}$, можно считать $K_{i1} = -h_{21\text{Э}1}$.

Далее, для эмиттерного повторителя по прежнему будет верна ранее упомянутая формула $K_{i2} = (1 + h_{21\text{Э}2})$. Следовательно, коэффициент усиления по току двухкаскадного усилителя будет следующим:

$$K = K_{i1} \cdot K_{i2} = -h_{21\text{Э}1} \cdot (1 + h_{21\text{Э}2}) \cdot \frac{R_{\text{К}1} // R_3 // R_4}{R_{\text{К}1} // R_3 // R_4 + Z_{\text{вх}2}} \approx$$

$$\approx -h_{21\text{Э}1} \cdot (1 + h_{21\text{Э}2}),$$

то есть можно считать его равным произведению коэффициентов усиления каждого из каскадов.

Входной импеданс двухкаскадного усилителя будет примерно равен входному импедансу входного каскада, то есть усилителя с ОЭ. Считается, что его числовое значение будет составлять примерно 3 кОм.

Выходной импеданс двухкаскадного усилителя будет примерно равен выходному импедансу выходного каскада, то есть эмиттерного повторителя. Считается, что его числовое значение будет составлять примерно 35 Ом.

Характеристики усилителя на высоких частотах

В этой главе мы рассматривали конденсаторы, пользуясь следующими приближениями:

- 1) При постоянном токе угловая частота $\omega = 0$, поэтому импеданс равен ∞ .
- 2) Ёмкости конденсаторов очень велики, поэтому на переменном токе импеданс равен 0 (другими словами, конденсаторы можно считать замкнутыми накоротко).

Эти два приближения очень важны с точки зрения анализа электронных схем, можно также сказать, что они сильно облегчают анализ. Однако эти приближения имеют ограничения. Известно, что для очень высоких частот переменного тока **обеднённый слой** внутри транзистора начинает заметно вести себя как конденсатор. Другими словами, эффектом **паразитной ёмкости** уже невозможно пренебречь. Значит, **коэффициент усиления** и другие характеристики усилителя необходимо рассматривать, добавив к эквивалентной схеме конденсатор, который выражает паразитную ёмкость.

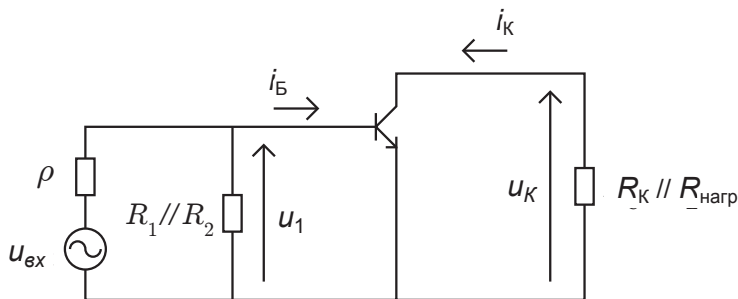


Рис. 6-А6 Схема усилителя с ОЭ для переменной составляющей тока

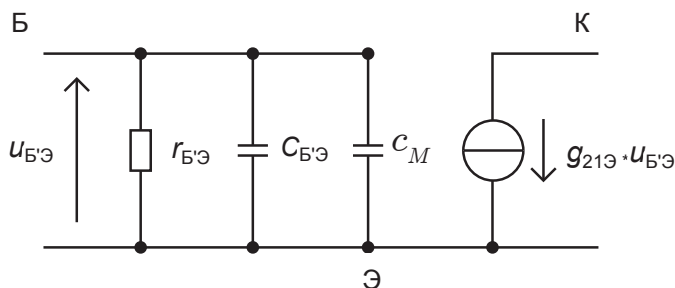


Рис. 6-А7 Эквивалентная схема транзистора для высоких частот

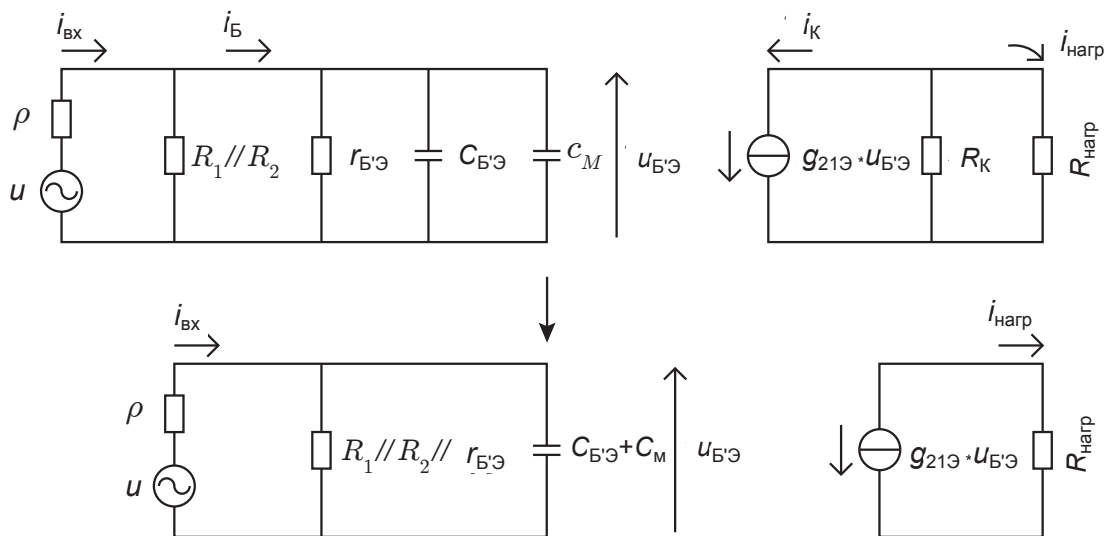


Рис. 6-А8 Эквивалентная схема усилителя с ОЭ для высоких частот ($R_K \gg R_{нагр}$)

Например, если в усилителе с общим эмиттером, который подобен показанному на рис. 6-А6, заменить транзистор на его эквивалентную схему для высоких частот, содержащую паразитные ёмкости, получится эквивалентная схема с конденсаторами, как показано на рис. 6-А8. В эквивалентной схеме транзистора для высоких частот на рис. 6-А7 конденсатор $C_{Б'Э}$ представляет паразитную ёмкость эмиттерного перехода, а C_M – это ёмкость, возникающая в результате сочетания паразитной ёмкости коллекторного перехода и эффекта Миллера. В этом случае коэффициент усиления по току K_i будет выражаться следующей формулой.

$$i_{BX} = \left(\frac{1}{R_1 // R_2 // r_{Б'Э}} + j\omega(C_{Б'К} + C_M) \right) \cdot u_{Б'Э}$$

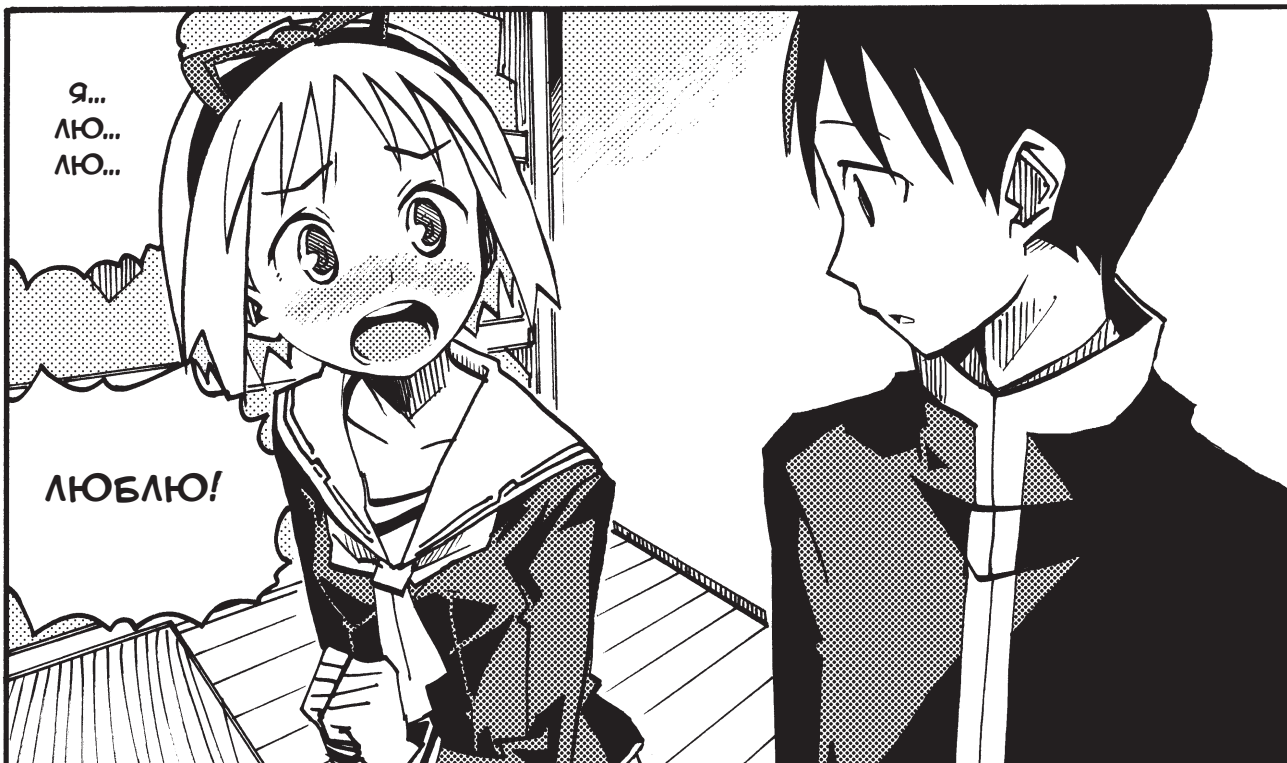
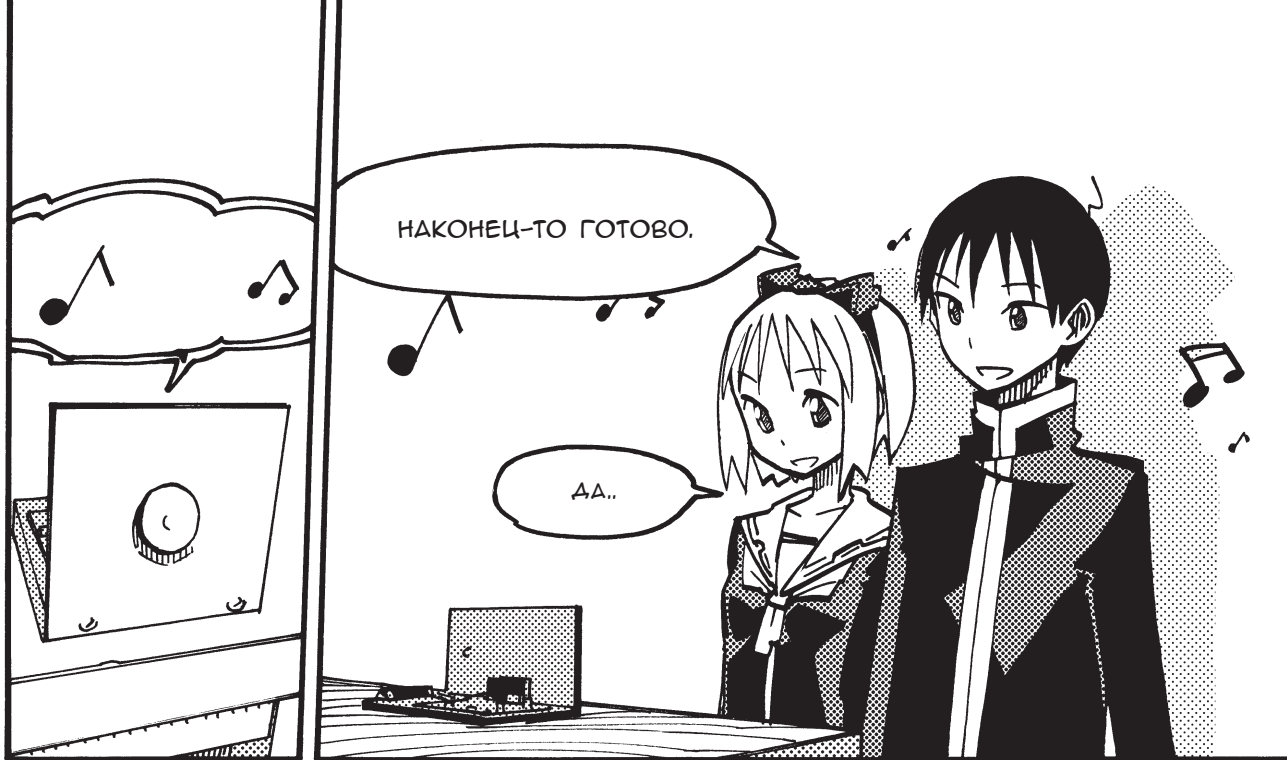
$$i_{нагр} = g_{21Э} \cdot u_{Б'Э} \cdot \left(\frac{R_K}{R_K + R_{нагр}} \right) \approx g_{21Э} \cdot u_{Б'Э} \quad (R_K \gg R_{нагр})$$

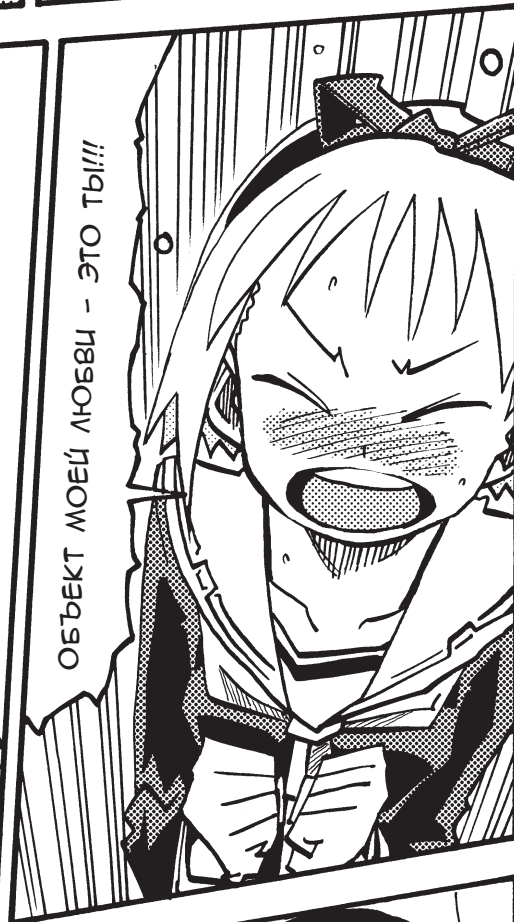
$$K_i = \left(\frac{-g_{21Э} \cdot (R_1 // R_2 // r_{Б'Э})}{1 + j\omega(C_{Б'К} + C_M) \cdot (R_1 // R_2 // r_{Б'Э})} \right)$$

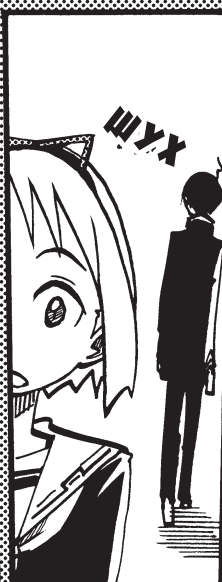
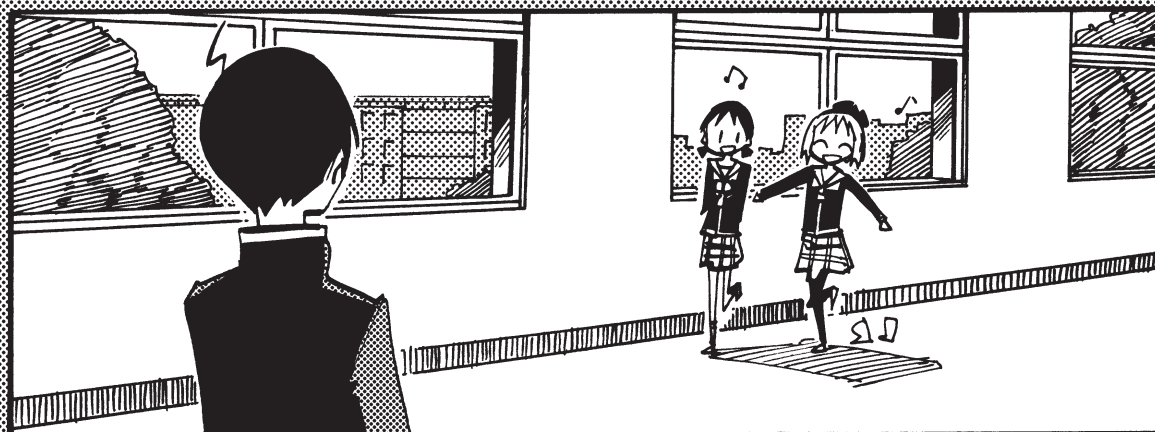
Здесь K_i является функцией угловой частоты ω , и можно сказать, что когда угловая частота превышает значение

$$\omega = \frac{1}{(C_{Б'Э} + C_M) \cdot (R_1 // R_2 // r_{Б'Э})},$$

величина K_i , обозначаемая как $|K_i|$, резко уменьшается. Таким образом, на высоких частотах, то есть когда ω сильно увеличивается, возникает такая проблема, как снижение коэффициента усиления по току. Следовательно, так как в резонансном усилителе используются **сигналы высокой частоты**, такие как сигнал радиоволны того канала, который мы хотим принять, необходимо рассматривать эквивалентную схему транзистора для высоких частот. Стоит заметить, что **в усилителе с общим эмиттером, в эмиттерном повторителе**, которые рассматриваются в этой главе, используются сигналы с частотами не выше звуковых, поэтому высокие частоты здесь проблем не создают.









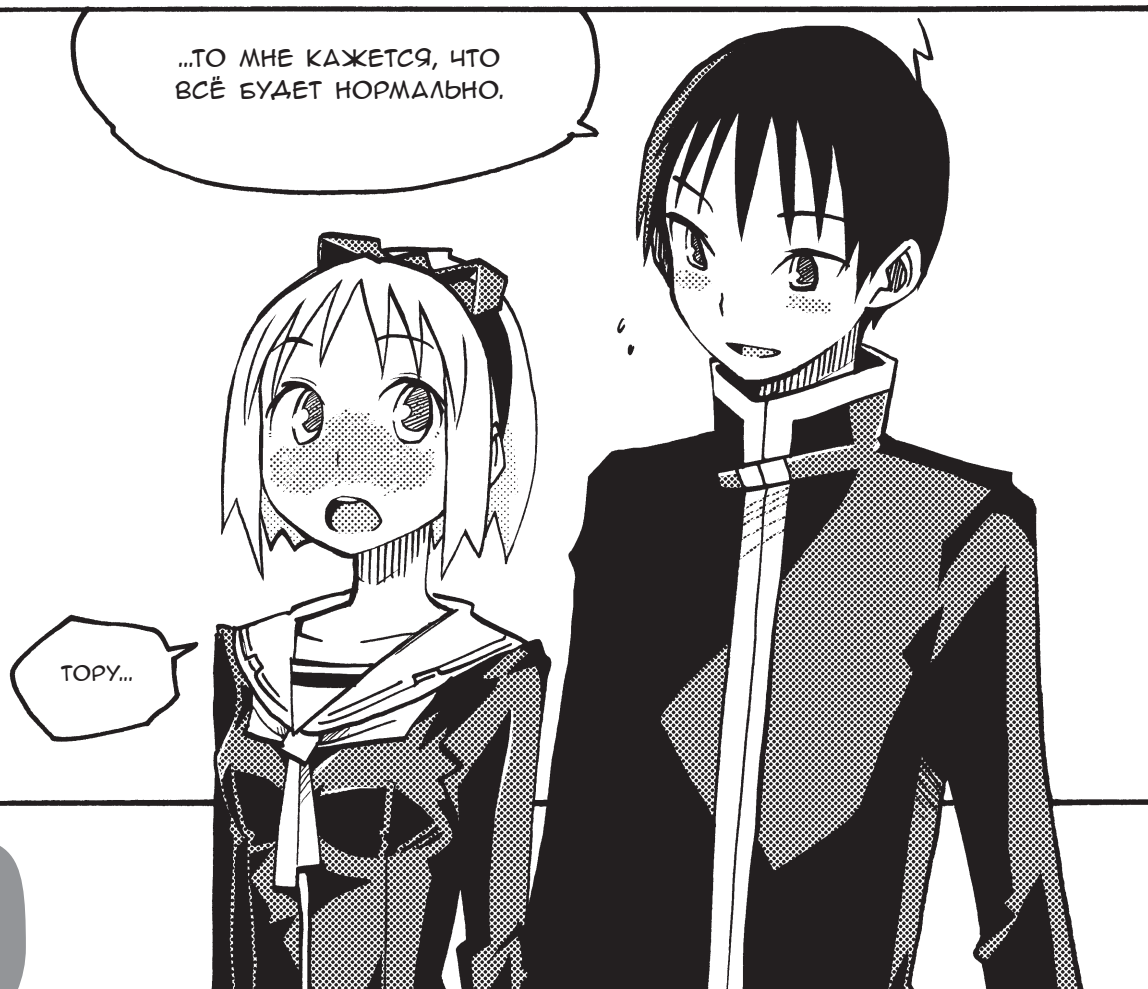
ИЗВИНИ!
Я ТАКИЕ ВЕЩИ
ПЛОХО ЗАМЕЧАЮ.

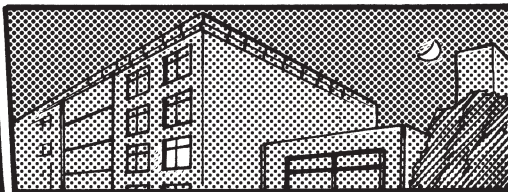
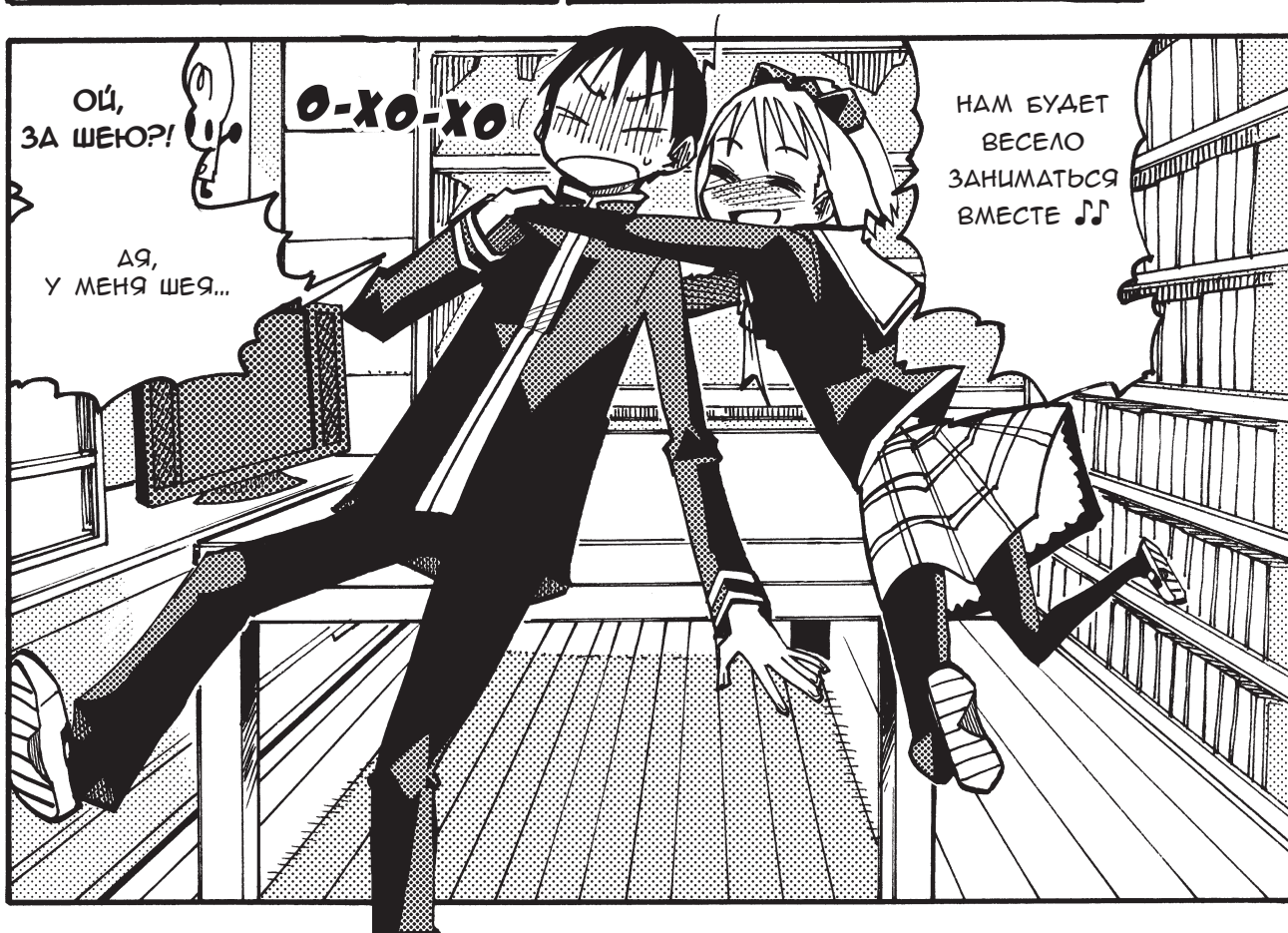
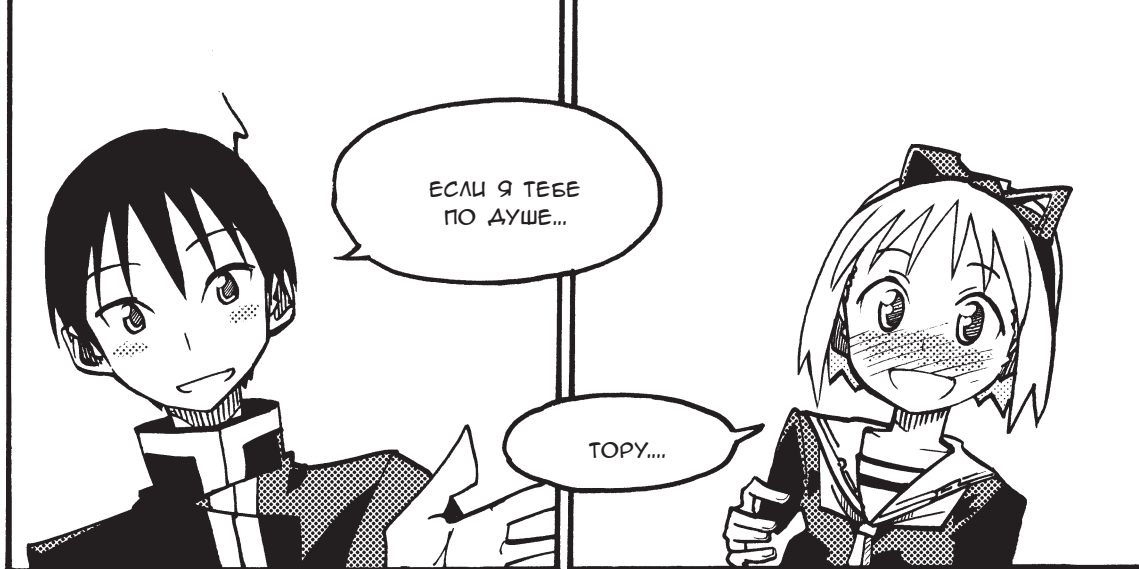


ОДНАКО, ЕСЛИ
ВМЕСТЕ С ТОБОЙ,...



...ТО МНЕ КАЖЕТСЯ, ЧТО
ВСЁ БУДЕТ НОРМАЛЬНО.





ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алюминий 38
Амплитудная модуляция 82, 122
Амплитудно-модулированная волна 84, 102, 111
Анализ цепей 62
Антенна 24, 81
Атомы 36

Б

База 30, 45, 56, 92, 103, 131, 143, 157, 165
Безразмерные величины 70
Буферные каскады 148, 154, 166

В

Валентные электроны 36
Варикап 123
Внутреннее сопротивление 75, 145
Волна несущей частоты 83, 122
Входное напряжение 69, 75, 155
Входной импеданс 69, 145, 157, 162
Входной ток 69, 76, 132, 141, 156
Выбор частоты 24, 81, 102, 111
Вывод коллектора 149
Вывод эмиттера 149
Выпрямление 22, 41, 113
Выпрямитель 22, 43, 113
Выходная полная проводимость 69
Выходное напряжение 28, 69, 75, 114
Выходной импеданс 123, 146, 158, 160
Выходной каскад усилителя 149
Выходной ток 69, 76, 132, 141

Г

Гармоническая волна 14, 28
Генератор с мостом Вина 28
Генераторы 14
Германий 35
Громкоговоритель 130, 146, 161

Д

Двуокись кремния 55
Демодуляторы 12, 23, 110
Демодуляция 12, 23, 110
Детектирование огибающей 114
Децибел 76, 160
Диод 11, 29, 123
Дифференциаторы 18, 27
Диэлектрики 34
Дырки 38, 46, 56, 93

Ё

Ёмкость Миллера 105

З

Закорачивание 75, 90
Затвор 54
Звуковой сигнал 13, 24, 84, 111
Земля 27, 131, 151

И

Изолирующая плёнка 56
Импеданс 27, 65, 89, 105, 132, 145, 157
Интегратор 18, 27
Искажения 137
Исток 54
Источник входного сигнала 145
Источник питания 12, 21, 66, 75, 90, 133, 142, 151
Источники напряжения 75
Источники питания (как электронные схемы) 12, 21
Источники тока 12, 67, 75, 95, 104, 146, 153

К

Катушка индуктивности 11, 65, 88, 123, 133
Ковалентная связь 36
Коллектор 30, 45, 92, 103, 131, 148, 151, 165
Комплексные числа 76
Конденсатор 11, 65, 88, 92, 114, 123, 133, 159, 165
Коэффициент обратной связи по напряжению 69
Коэффициент передачи эмиттерного тока 143
Коэффициент прямой передачи тока 69
Коэффициент усиления 27, 71, 97, 102, 133, 141, 155, 160
Коэффициент усиления по напряжению 75, 155, 162
Коэффициент усиления по току 76, 97, 101, 133, 141, 155, 160
Кремний 35
Кристалл 36

Л

Легирующая примесь 55
Линейное детектирование 11, 111

М

Модуляторы 12

Н

Напряжение 22, 30, 41, 55, 62, 75, 95, 114, 135, 155, 162
Напряжение затвора 56

Напряжение обратного смещения 42, 93
Напряжение отсечки 55
Напряжение постоянного тока 12, 90, 135, 151
Напряжение прямого смещения 41
Напряжение смещения 41, 55, 93, 134, 150, 162
Несущая волна 84, 113, 122
Носители заряда 56, 93

О

Обеднённый слой 55, 94, 164
Общая ёмкость 104
Одночастотный резонансный усилитель 88
Оксидная плёнка 56
Операционный усилитель 12, 27, 149
Опэ-ампу 18
Ослабление 75

П

Паразитные ёмкости 92, 103, 165
Параллельная RLC-цепь 11, 65
Параллельный импеданс 89
Переменный ток 12, 21
Полупроводники 11, 40, 50
Полупроводники *n*-типа 39, 43
Полупроводники *p*-типа 38
Последовательный импеданс 89
Постоянный ток 12, 22, 42, 55, 75, 90, 132, 150, 164
Правила Кирхгофа 62, 135
Предельная частота 76
Приёмная антенна 23
Примеси 36
Проводники 35
ПТ МОП (MOS-FET) 55
ПТУП (J-FET) 54

Р

Рабочая точка 136, 150
Радиоволны 15, 24, 81, 91, 102, 122, 156, 160
Разность потенциалов 27
Резонансный усилитель 82, 90, 102

С

Свободные электроны 36, 93
Сигнал переменного тока 14, 92, 130
Сопротивление 22, 30, 62, 75, 88, 92, 104, 114, 132, 145, 152, 160
Сопротивление базы 104
Сопротивление нагрузки 105, 152
Спектр 82, 102
Статическая нагрузочная прямая 136, 150
Сток 54
Схема И 29
Схема ИЛИ 30
Схема НЕ 30

Т

Ток базы 48, 56, 95, 136
Ток в нагрузке 143
Ток затвора 56
Ток стока 55
Транзистор 91, 103, 133, 140, 152, 164
Транзисторы *n-p-n*-типа 49

У

Угловая частота 66, 101, 116, 164
Униполярные транзисторы 56
Усиление 12, 23, 66, 82, 90, 102, 110, 130, 140, 155, 160
Усилитель 12, 23, 81, 90, 102, 130, 140, 157, 160
Усилитель низких частот 23, 130
Усилитель с общей базой 131, 157
Усилитель с общим коллектором 131, 148
Усилитель с общим эмиттером 88, 95, 104, 131, 140, 160
Усреднение 112

Ф

Фильтр верхних частот 115
Фильтр низких частот 114
Фильтры 12, 16, 112, 114
Форма волны сигнала 84, 102, 114

Х

Характеристики на высоких частотах 164

Ц

Цепь переменного тока 138
Цепь смещения 134, 150
Цифровые схемы 28

Ч

Частотная модуляция 122
Частотная характеристика 76, 85, 97, 102

Ш

Шунтирующий конденсатор 56

Э

Эквивалентная схема для высоких частот 91, 103, 166
Эквивалентная схема для переменного тока 90, 104, 138, 163
Элемент, управляемый напряжением 56
Элемент, управляемый током 56
Эмиттер 37, 45
Эмиттерный повторитель 148, 154, 166
Эмиттерный ток 48, 56
Энергия 147, 160
Эффект выпрямления 41
Эффект Миллера 92, 105, 165
Эффект усиления 132, 144

ОБ АВТОРЕ

Танака Кэнъити родился в 1969 году в префектуре Миядзаки. В 1990 году закончил отделение Электротехники (в настоящее время – отделение Электротехники и информатики) государственной профессиональной старшей школы «Мияко-но-дзё». В 1994 году закончил курс магистра технических наук первой ступени аспирантуры Промышленного университета Кюсю. Работал ассистентом в отделении Электротехники (в настоящее время – отделение Электротехники, электроники и информатики) технического факультета Промышленного университета Кюсю. В настоящее время является доцентом, доктором наук (Техника, Промышленный университет Кюсю) отделения Биологической электрики и электроники факультета Науки и техники университета Мейдзи.

Основные произведения – «Технология цифровых водяных знаков», изд. Токийского университета электротехники; «Технические основы носителей изображения», изд. KYORITSU SHUPPAN CO., LTD.

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу:

115487, г. Москва, 2-й Нагатинский пр-д, д. 6А

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: www.aliants-kniga.ru.

Оптовые закупки: тел. (499) 782-38-89

Электронный адрес: books@aliants-kniga.ru.

Танака Кэнъити (автор), Такаяма Яма (художник)

Электронные схемы. Манга

Издательство выражает благодарность В. О. Панфилову

Главный редактор Д. А. Мовчан

dmkpress@gmail.com

Перевод с японского А. Б. Клионский

Научный редактор А. Л. Марченко

Верстальщик Н. В. Паранская

Корректор Г. И. Синяева

Формат 70×100/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем 11,5 п. л. Усл. п. л. 17,25 Тираж 500 экз.

Веб-сайт издательства ДМК Пресс: www.dmkpress.com

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА



ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ МАНГА

ЧТОБЫ ОБЪЯСНИТЬ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ "С НУЛЯ", В ЭТОЙ КНИГЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ТРАНЗИСТОРНЫЙ РАДИОПРИЁМНИК - В ДОСТУПНОЙ ФОРМЕ ОПИСЫВАЮТСЯ ПРОЦЕССЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИНИМАЕМЫХ АНТЕННОЙ РАДИОВОЛН, ЗАКАНЧИВАЮЩИЕСЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕМ ЗВУКА. ОБЫЧНО МНОГИЕ УЧЕБНИКИ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ НАЧИНАЮТСЯ С ОПИСАНИЯ ПРОСТЕЙШЕГО УСИЛИТЕЛЯ, А ЗАТЕМ ПОСТЕПЕННО ПЕРЕХОДЯТ К БОЛЕЕ СЛОЖНЫМ СХЕМАМ. АВТОР УВЕРЕН, ЧТО БОЛЕЕ ЕСТЕСТВЕННО ОСВАИВАТЬ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ, ДВИГАЯСЬ ВОДОЛЬ ПУТИ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛА ОТ РАДИОВОЛНЫ К ЗВУКУ.

А ЧТОБЫ ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ БЫЛ ЕЩЁ УВЛЕКАТЕЛЬНЕЕ, В МАНГЕ ВАМ СОСТАВЯТ КОМПАНИЮ ДВА ПЕРСОНАЖА - УЧЕНИКИ СТАРШЕЙ ШКОЛЫ СИДЭН ТОРУ И ЭРЭКИ ДЯ.

ПРОСТОТА ИЗЛОЖЕНИЯ И УВЛЕКАТЕЛЬНЫЙ СЮЖЕТ О ЛЮБВИ СТАРШЕКЛАССНИКОВ ПОМОЖЕТ НАЧИНАЮЩИМ ЛЮБИТЕЛЯМ ЭЛЕКТРОНИКИ ПОЛУЧИТЬ БАЗОВЫЕ ЗНАНИЯ ПО ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ.

Интернет-магазин: www.dmkpress.com

Книга-почтой: orders@aliants-kniga.ru

Оптовая продажа: "Альянс-книга"

(499)782-3889. books@aliants-kniga.ru



www.dmk.pf

ISBN 978-5-97060-353-6



9 785970 603536 >

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ
МАНГА



Танака Кэнъити
Такаяма Яма
Trend-Pro Co., Ltd.