

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

МАНГА

ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

Танака Кэнъити

Такаяма Яма

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ
МАНГА



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

Омша
Ohmsha

ДМК
издательство

Электронные схемы

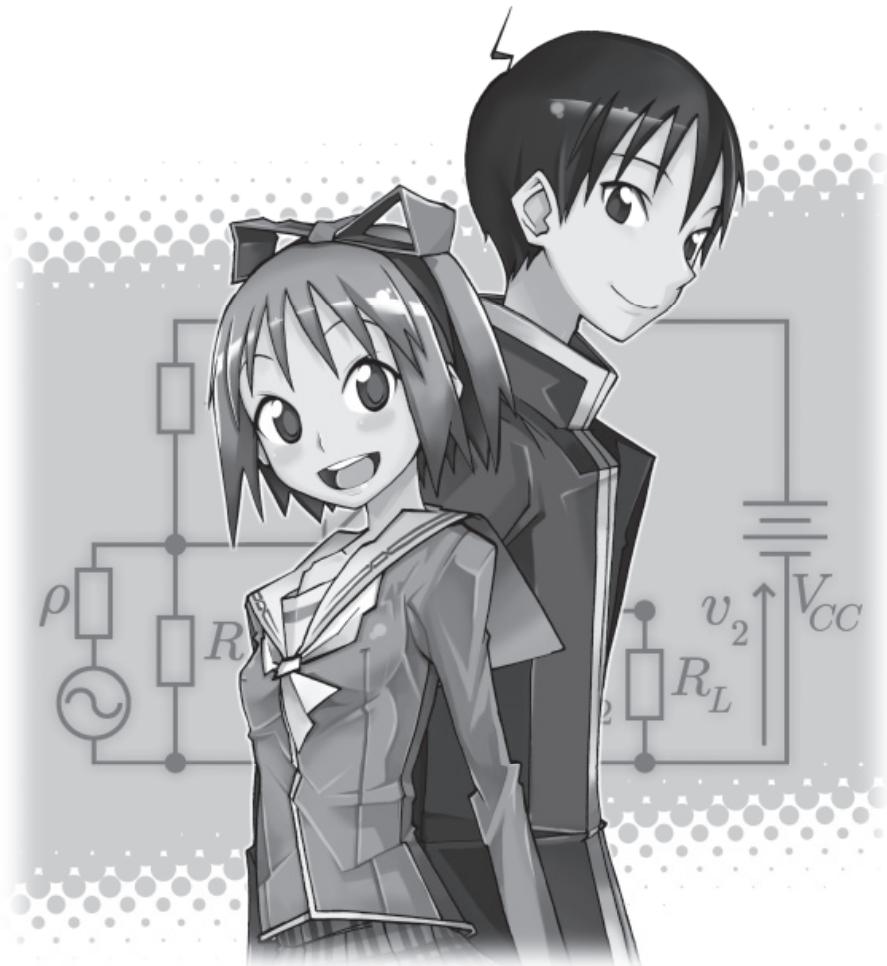
Манга



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.



Москва
ДМК Пресс, 2016

УДК 621.38.01

ББК 32.85

К35

Танака Кэнъити

К35 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 Такаяма 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. БЕСПОКОЙНЫЙ 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 <i>p-n-p</i> -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 <i>h</i>-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>i</i> и <i>j</i> 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. ДЕМОДУЛЯТОР 107

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 низких частот.....	115
Фильтры верхних частот	116
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	122
О частотной модуляции (ЧМ).....	122

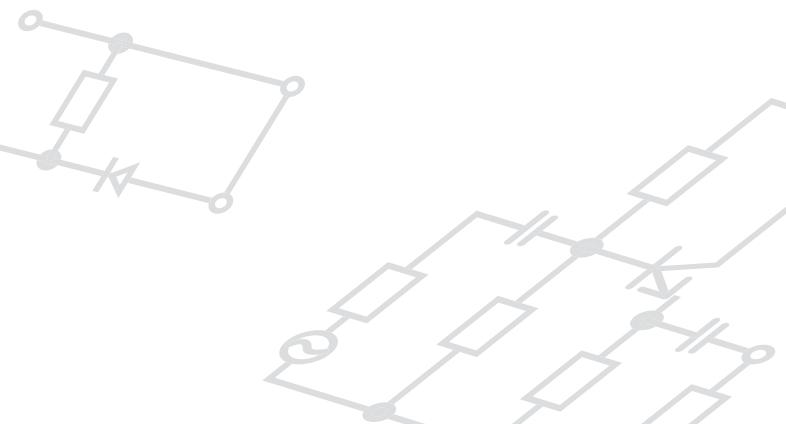
Глава 6. УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ 125

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 $Z_{\text{вх}}$ (1).....	145
Выходной импеданс $Z_{\text{вых}}$ (1)	146

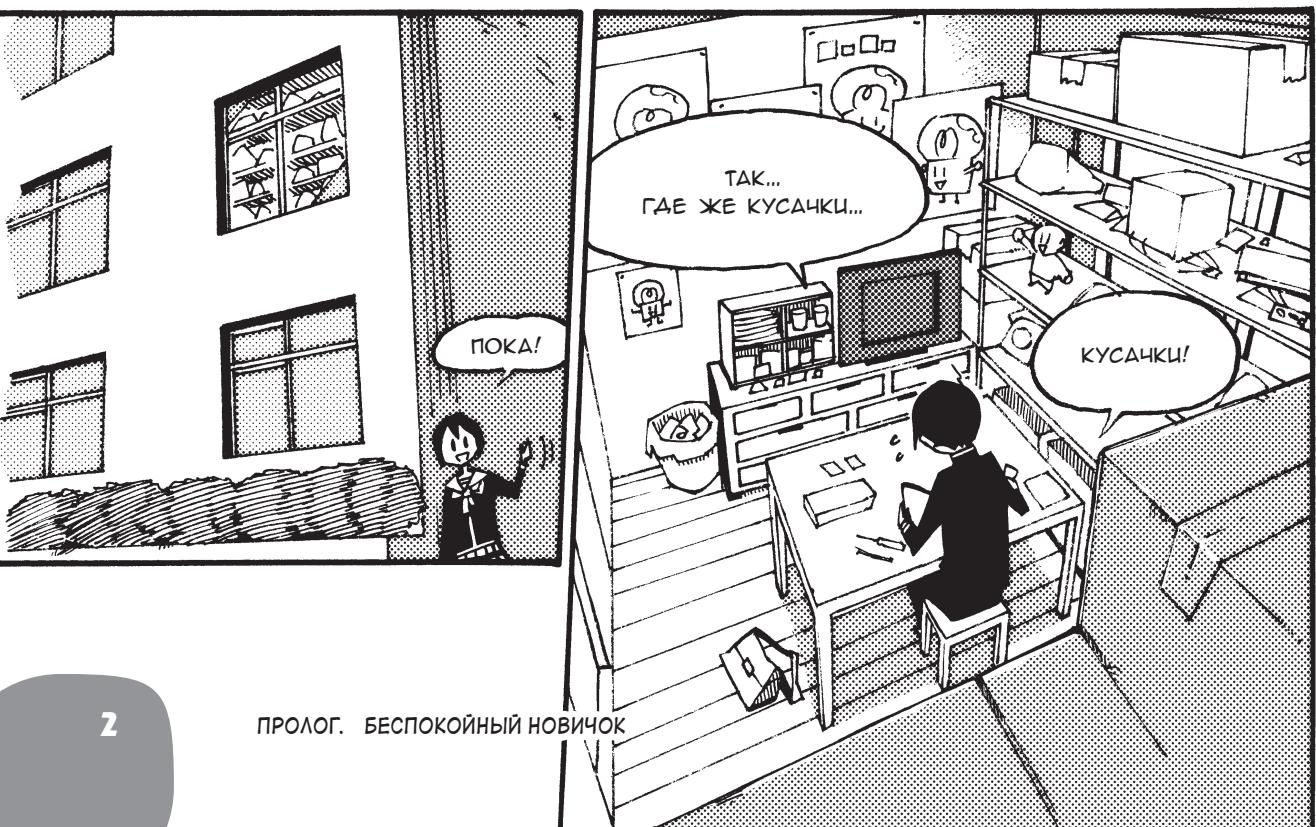
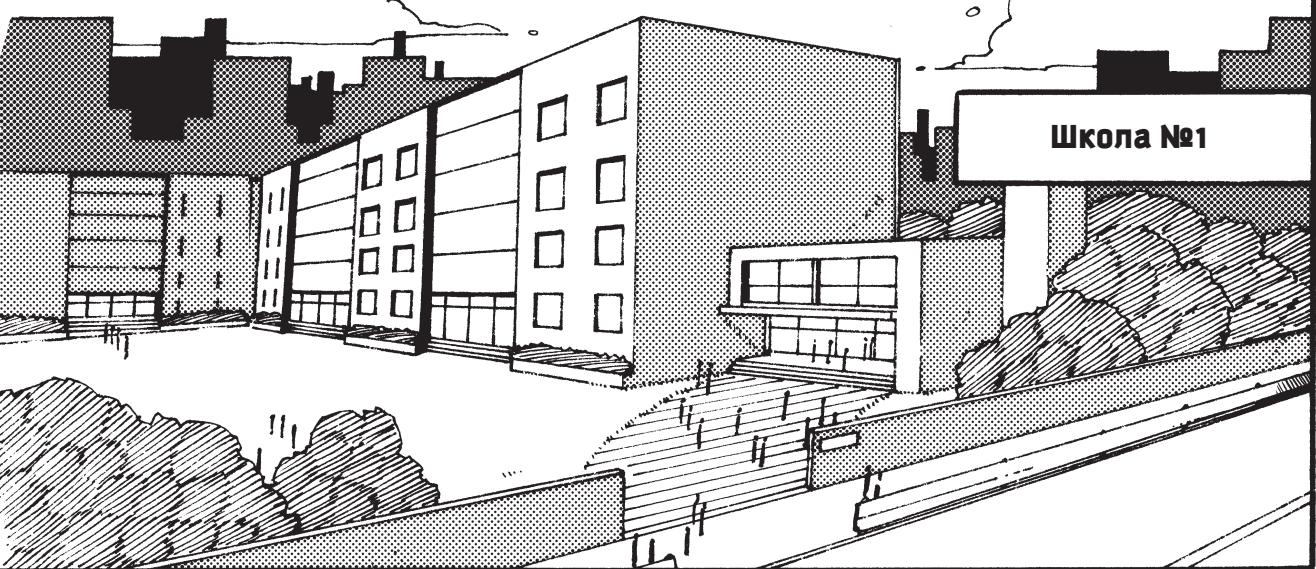
6.3. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ	148
6.3.1. ЭМИТТЕРНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ	148
Буферный каскад	148
6.3.2. РАСЧЁТ ЦЕПИ СМЕЩЕНИЯ	150
6.3.3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	151
6.3.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ УСИЛЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ТОКУ	155
Коэффициент усиления по напряжению	155
Коэффициент усиления по току	156
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

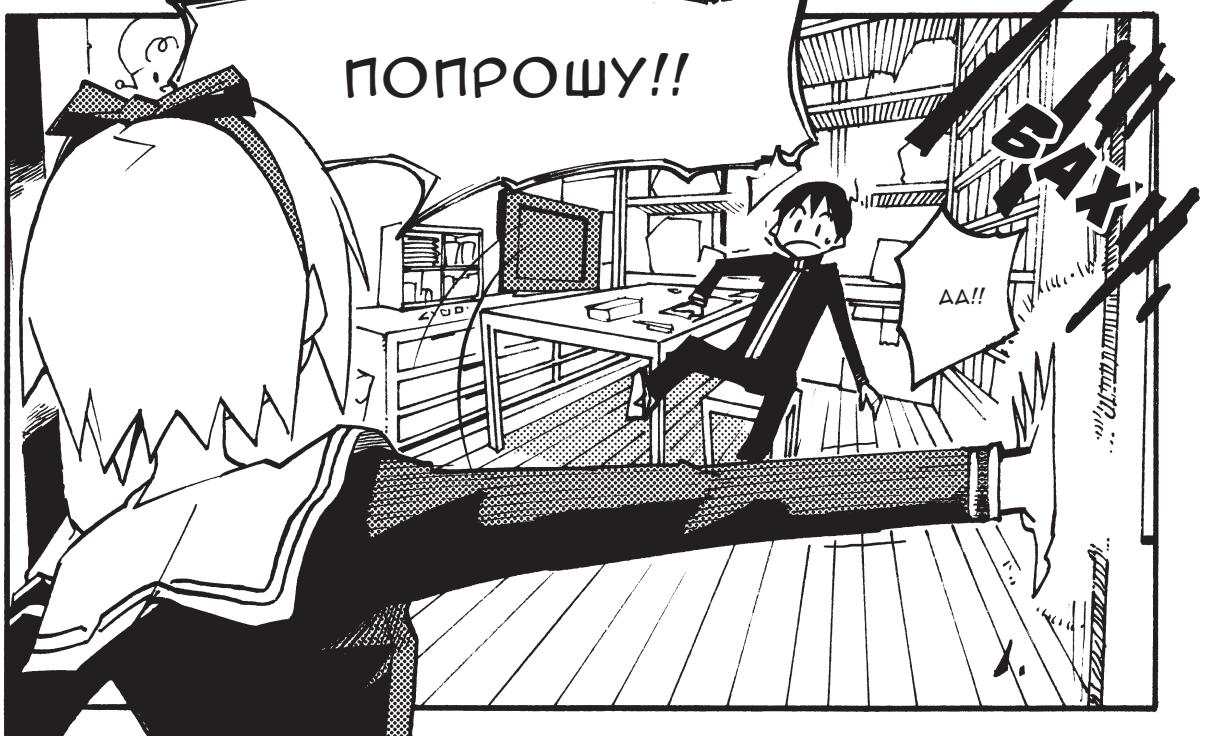
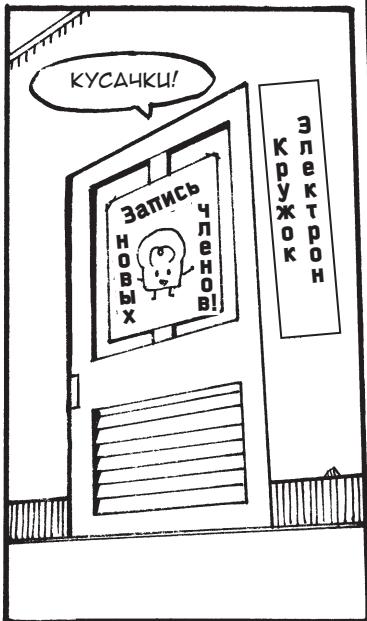
ПРОЛОГ.

БЕСПОКОЙНЫЙ НОВИЧОК

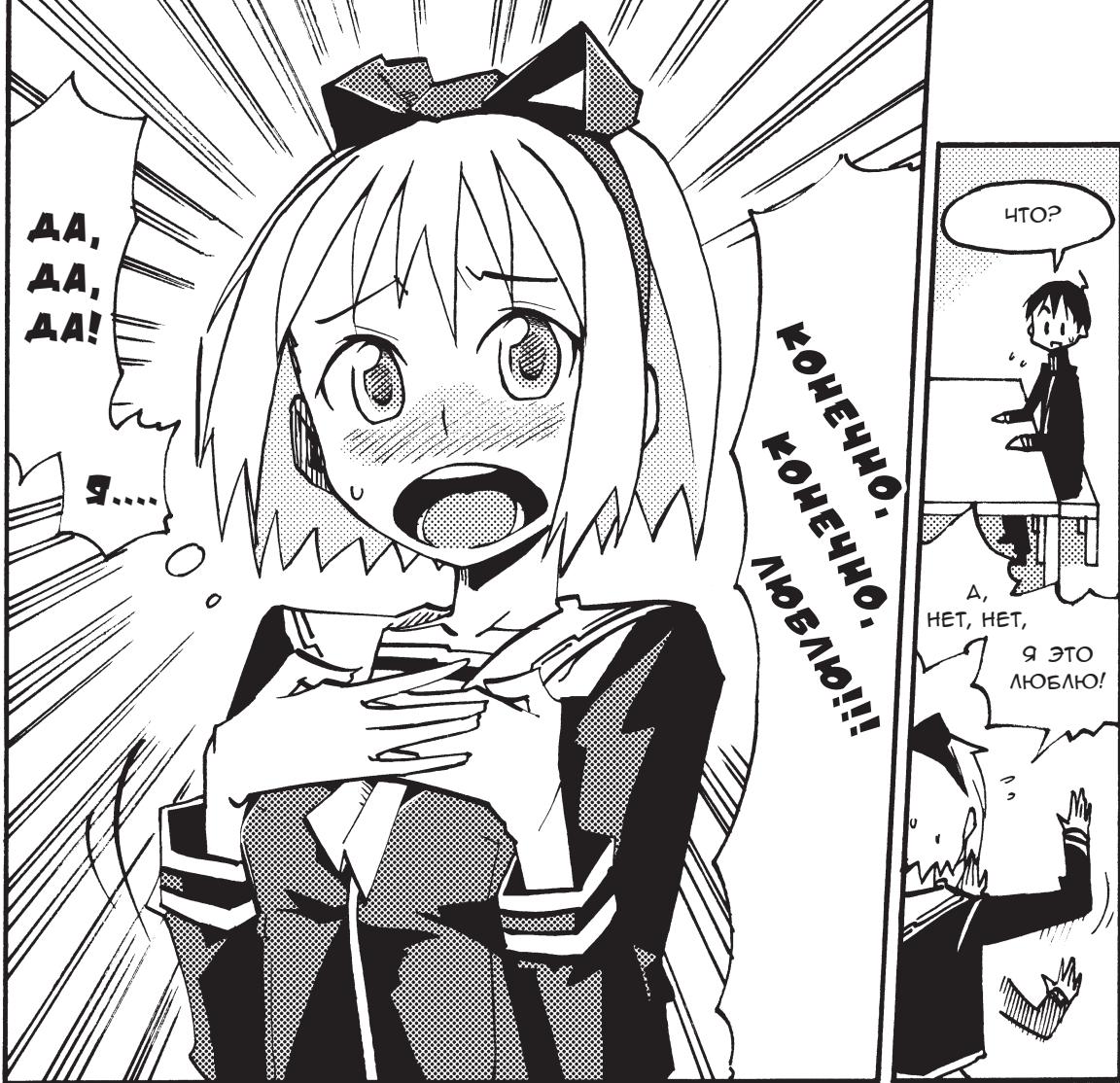


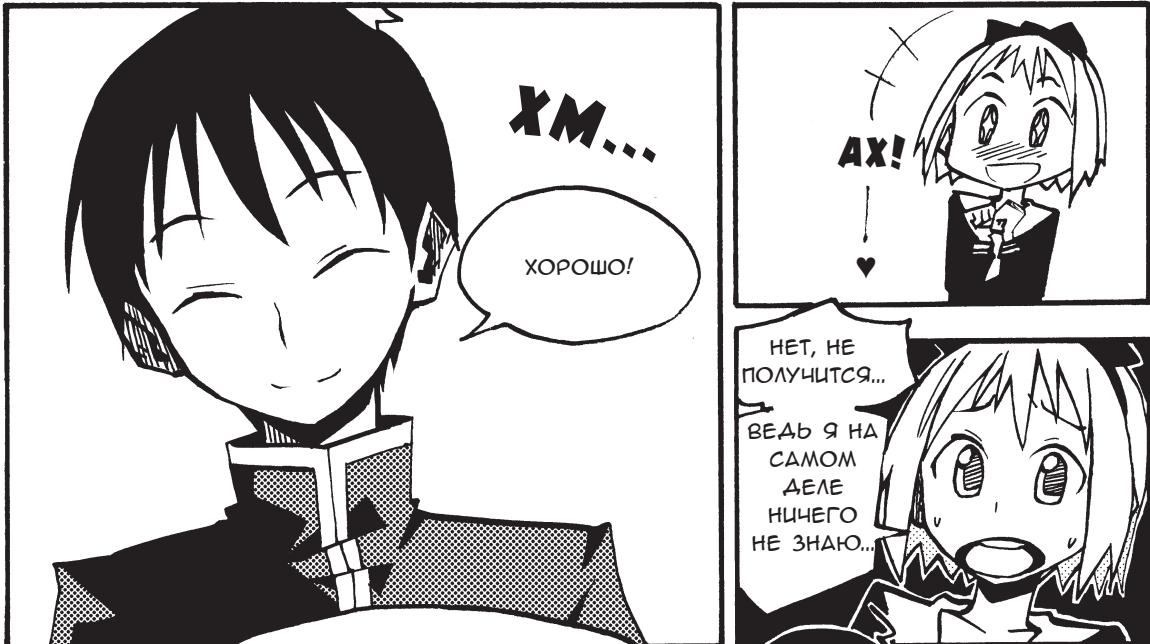
Школа №1



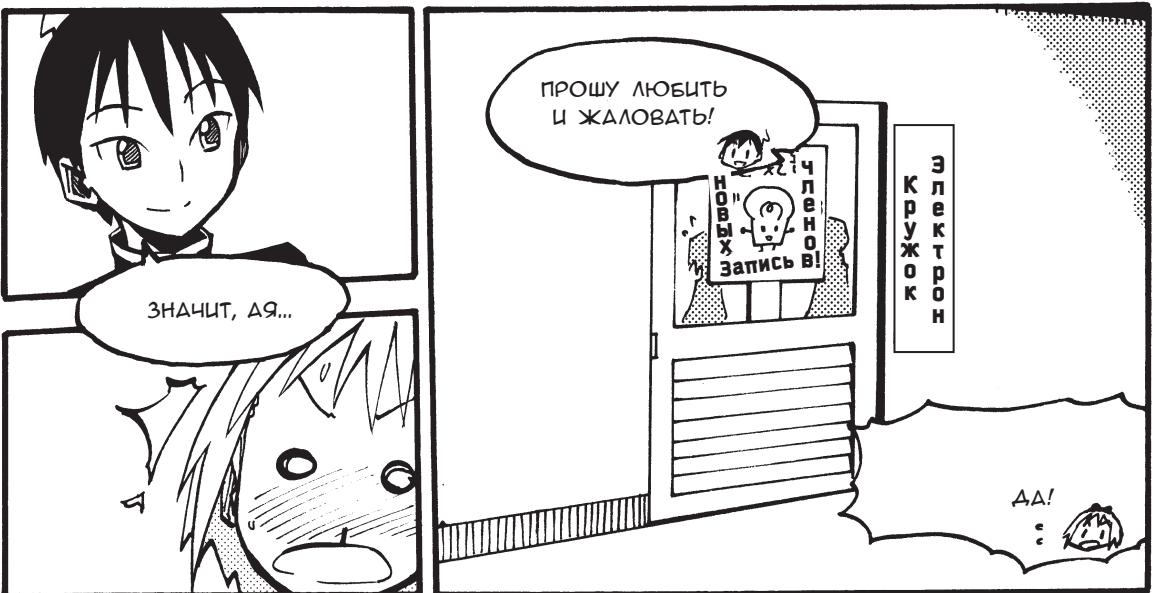








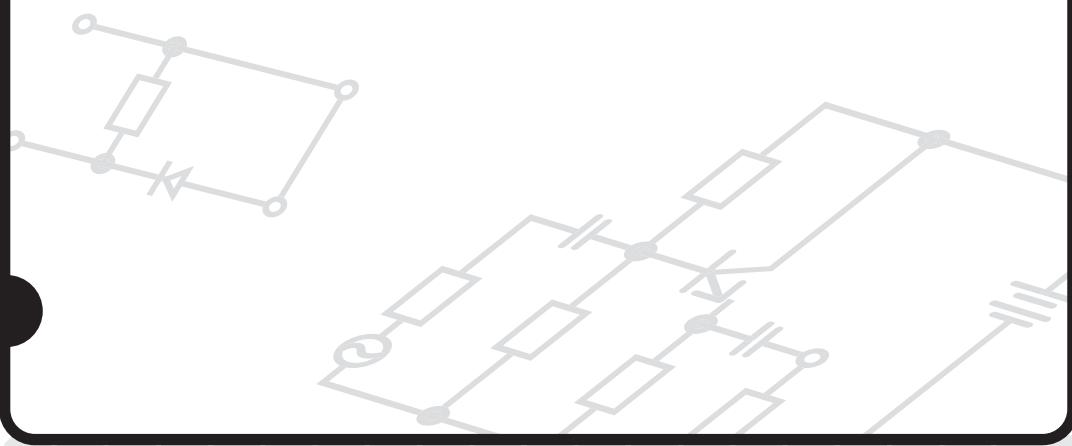


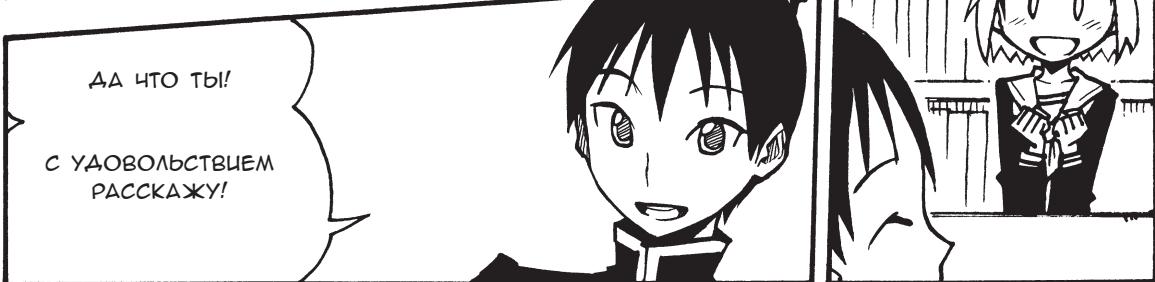


1

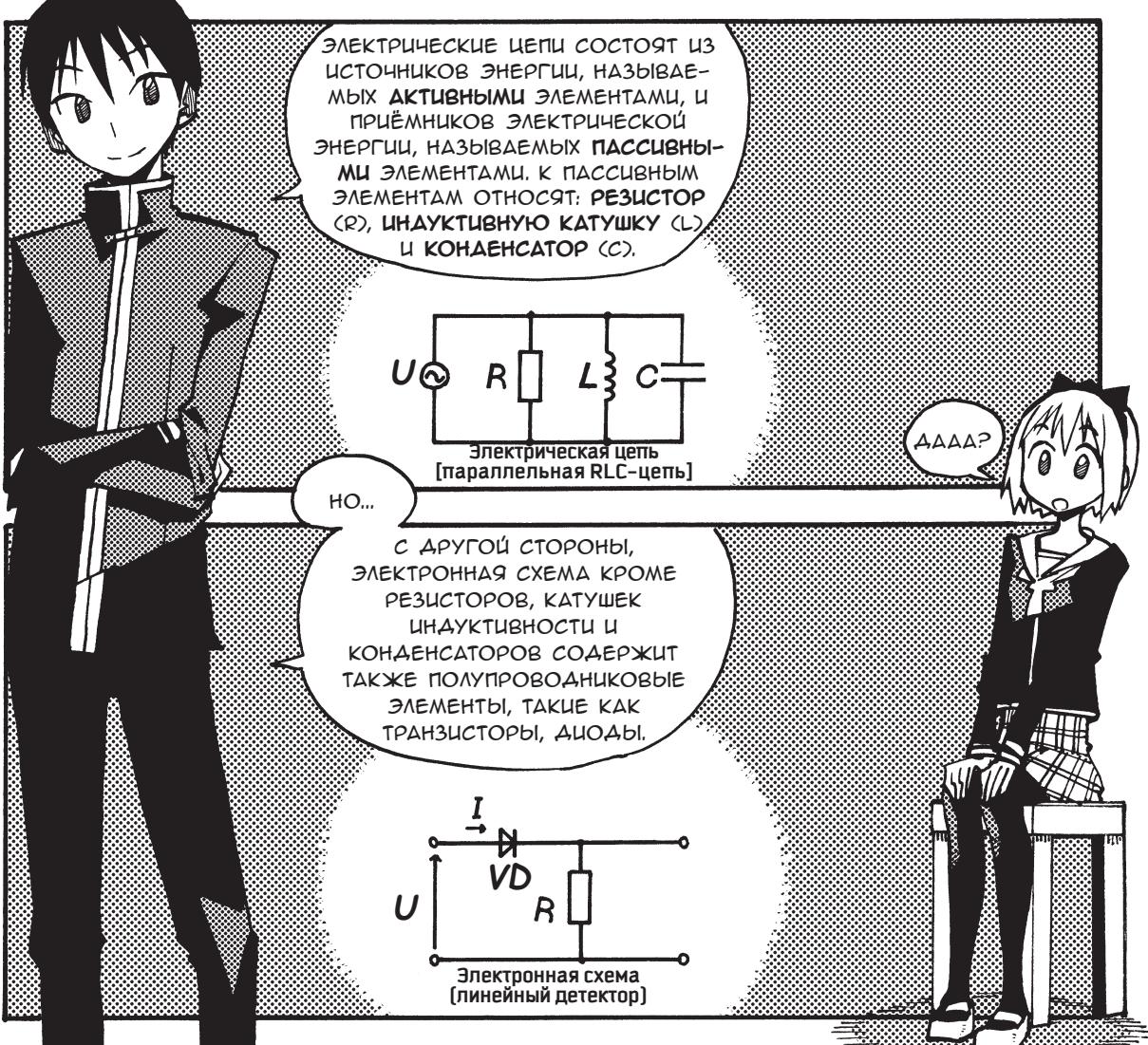
ГЛАВА

ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ? А ЧТО ЭТО ТАКОЕ?





1.1. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА



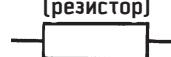
ИХ ОТЛИЧИЯ МОЖНО
ПРЕДСТАВИТЬ В
ВИДЕ ВОТ ТАКОЙ
ТАБЛИЦЫ!

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

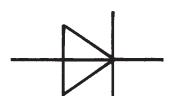
[а] Сопротивление
[резистор]



[б] Индуктивность
[катушка]



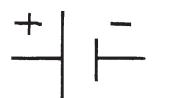
[г] Диод



[д] Транзистор



[е] Источник напряжения
постоянного тока



[ж] Источник напряжения
переменного тока



[з] Источник тока



ЗНАЧИТ, ЦЕПИ
ОТЛИЧАЮТСЯ
ТОЛЬКО
СОСТАВНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ?

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

1.2. РАЗЛИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

«Усилители»



<Генераторы>

ТЕПЕРЬ О ГЕНЕРАТОРАХ.

ЭТО СХЕМЫ, КОТОРЫЕ ГЕНЕРИРУЮТ?!

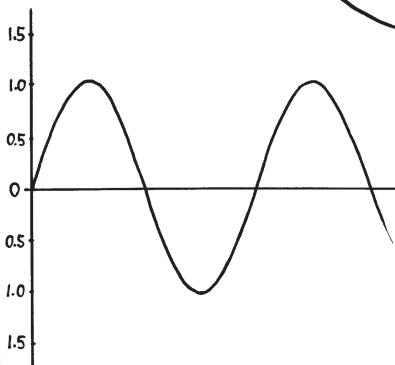
НУ, В ОБЩЕМ, ПРАВИЛЬНО...

ГЕНЕРАТОР - ЭТО ТАКОЕ УСТРОЙСТВО...

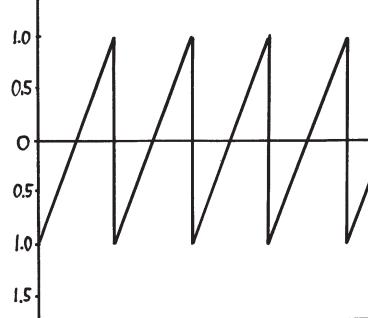
КОТОРОЕ СОЗДАЁТ «НА РОВНОМ МЕСТЕ» СИГНАЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЕГО ИСПОЛЬЗУЮТ, НАПРИМЕР, В МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНАХ...

ДААА?

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



Гармоническая волна



Пилообразная волна

ДА, УДОБНАЯ ШТУКА!

<Модуляторы>

ТРЕТЬИМ ПУНКТОМ
У НАС ИДУТ
МОДУЛЯТОРЫ.

ЧТОБЫ ПЕРЕДАТЬ
ЗВУКОВОЙ СИГНАЛ ДЛЯ
РАДИО ИЛИ ТЕЛЕВИЗОРА,
НЕОБХОДИМО НАЛОЖИТЬ
ЕГО НА РАДИОВОЛНУ,
КОТОРАЯ ИМЕЕТ ВЫСОКУЮ
ЧАСТОТУ КОЛЕБАНИЙ.

ДЛЯ ЭТОГО С ПОМОЩЬЮ
ЭТОЙ СХЕМЫ ИНОГДА
ИЗМЕНЯЮТ АМПЛИТУДУ
РАДИОВОЛНЫ, А ИНОГДА –
ЧАСТОТУ.

АХ,

ВОТ КАК?

КСТАТИ,

АМПЛИТУДНУЮ
МОДУЛЯЦИЮ
ОБОЗНАЧАЮТ АМ,
А ЧАСТОТНУЮ – FM.

НУ КАК, ВСПОМНИЛА?

КОНЕЧНО, ЭТО ЖЕ
ОБЫЧНОЕ РАДИО!
КАК ПРОСТО!

<Демодуляторы>

ЧЕТВЁРЫМ ПУНКТОМ У НАС ЦАУТ ДЕМОДУЛЯТОРЫ. ОНИ НУЖНЫ ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ИЗВЛЕКАТЬ, НАПРИМЕР, ЗВУК ИЗ СИГНАЛА, ПРИНЯТОГО ТЕЛЕВИЗОРОМ ИЛИ РАДИОПРИЁМНИКОМ.



<Фильтры>

ПЯтым пунктом цаут фильтры.

ЭТО...
КАК БЫ ЛУЧШЕ
ОБЪЯСНИТЬ...

ВОТ ЧТО ТЫ ДЕЛАЕШЬ,
КОГДА ХОЧЕШЬ
ПОСЛУШАТЬ ЛЮБИМУЮ
РАДИОПРЕДАЧУ?

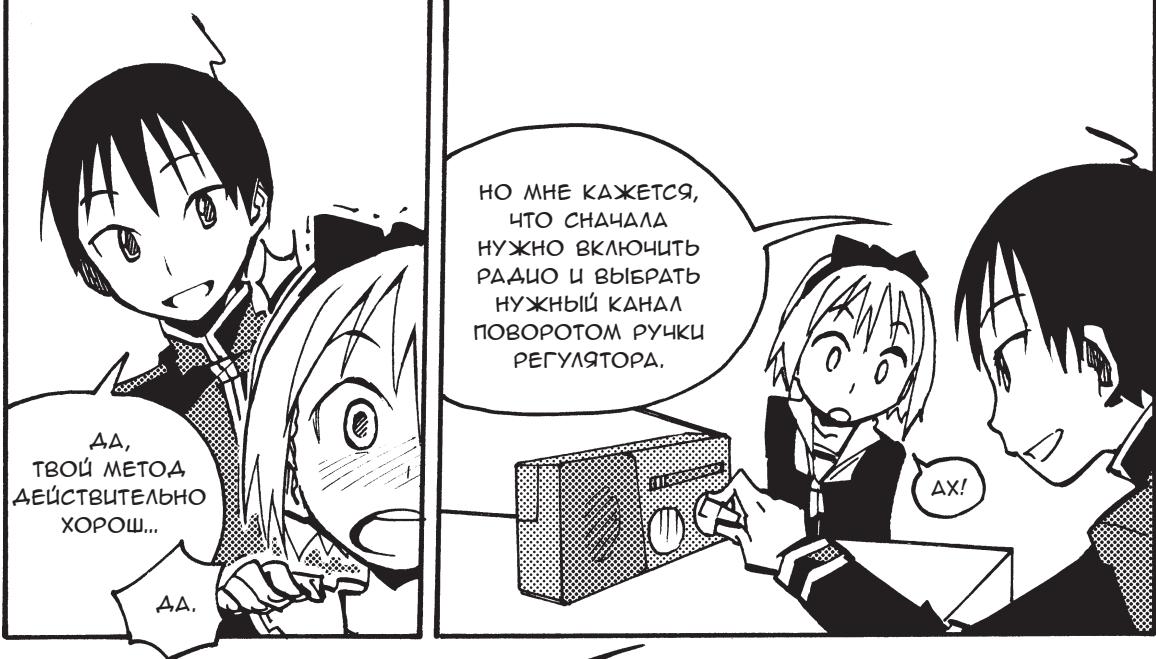
НУ, КАК СКАЗАТЬ...

СНАЧАЛА Я НАДЕВАЮ НАУШНИКИ, ЧТОБЫ ИЗОЛИРОВАТЬСЯ ОТ ВНЕШНЕГО МИРА...

И ВСЯ ПРЕВРАЩАЮСЬ В СЛУХ!

ТОГДА МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО Я ГОТОВА ПОГРУЗИТЬСЯ В МИР РАДИО!





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

АХ!



<Операционные усилители>

ТЕПЕРЬ
ШЕСТОЙ
ПУНКТ
**ОПЕРАЦИОННЫЕ
УСИЛИТЕЛИ**

ОНИ ВЫГЛЯДЯТ
ВОТ ТАК.

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ относится к интегральным схемам (микросхемам), содержащим в одном корпусе множество электронных компонентов, и обладает очень высокими характеристиками усиления.

А ЧЕМ
ОПЕРАЦИОННЫЙ
УСИЛИТЕЛЬ
ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ
ОБЫЧНОГО?

ДА?

ИСПОЛЬЗУЯ ЭТУ МИКРОСХЕМУ
КАК ГОТОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ,
МОЖНО УСТРАНИТЬ
ВЗАИМОВЛИЯНИЕ МЕЖДУ
ВХОДНЫМИ И ВЫХОДНЫМИ
ЧЕПЬЯМИ.

ПОНЯТНО.
СОВМЕСТНЫМИ
УСИЛИЯМИ
МОЖНО
МНОГОГО
ДОБИТЬСЯ...!!

ИСПОЛЬЗУЯ ЭТО
СВОЙСТВО, МОЖНО
СОЗДАВАТЬ, НАПРИМЕР,
ДИФФЕРЕНЦИАТОРЫ,
ИНТЕГРАТОРЫ,
ГЕНЕРАТОРЫ.

ДА,
ЧТО-ТО
ВРОДЕ
ТОГО!

ДИФФЕРЕНЦИАТОРЫ...
ИНТЕГРАТОРЫ...

<Логические схемы>

ИТАК, СЕДЬМЫМ ПУНКТОМ У НАС ЦАУТ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ.

ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ – ЭТО...

НЕТ,
НЕ НАДО!!!

ЧТО С ТОБОЙ?!
ТЫ ТАК РЕЗКО ПОДСКОЧИЛА!!

НА САМОМ ДЕЛЕ,
Я ОЧЕНЬ НЕ ЛЮБЛЮ
ВСЯКУЮ ТАМ
ЛОГИКУ!!!

НЕ ВОЛНУЙСЯ!

ХОТЬ ОНИ И НАЗЫВАЮТСЯ
«ЛОГИЧЕСКИМИ», НИЧЕГО
СЛОЖНОГО ТУТ НЕТ.
ВЕДЬ ОСНОВНЫХ БАЗОВЫХ
ВИДОВ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ
ВСЕГО ТРИ!

ВСЕГО ТРИ?!



(1.) СХЕМЫ «И» (ЛОГИЧЕСКОЕ УМНОЖЕНИЕ);
(2.) СХЕМЫ «ИЛИ» (ЛОГИЧЕСКОЕ СУММИРОВАНИЕ);
(3.) СХЕМЫ «НЕ» (ЛОГИЧЕСКОЕ ОТРИЦАНИЕ);
и т. п.

ВОТ ОСНОВНЫЕ БАЗОВЫЕ
ВИДЫ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ!



<Источники питания>



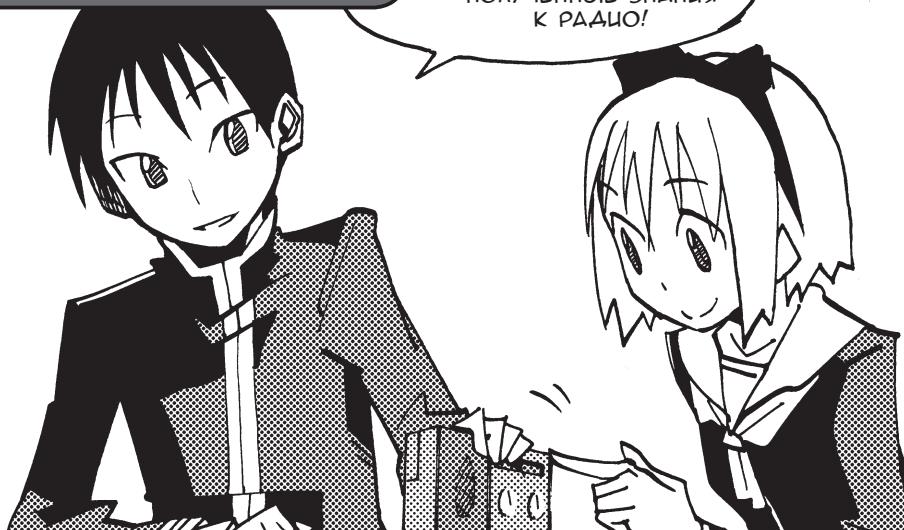
ЧТОБЫ ПРЕВРАТИТЬ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК В ПОСТОЯННЫЙ, НАДО СНАЧАЛА С ПОМОЩЬЮ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ОТРЕЗАТЬ ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ НАПРЯЖЕНИЯ, ЗАТЕМ СГЛАДИТЬ ВОЛНУ С ПОМОЩЬЮ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА...

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



1.3. ПРОСТЕЙШИЙ ПРИМЕР РАДИОПРИЁМНИКА

ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ ПРИМЕНить ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАНИЯ К РАДИО!



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

ДА!



ПРОСТЕЙШАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РАДИОПРИЁМНИКА...

...ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК,

[1] Приёмная антенна

[5] Громкоговоритель

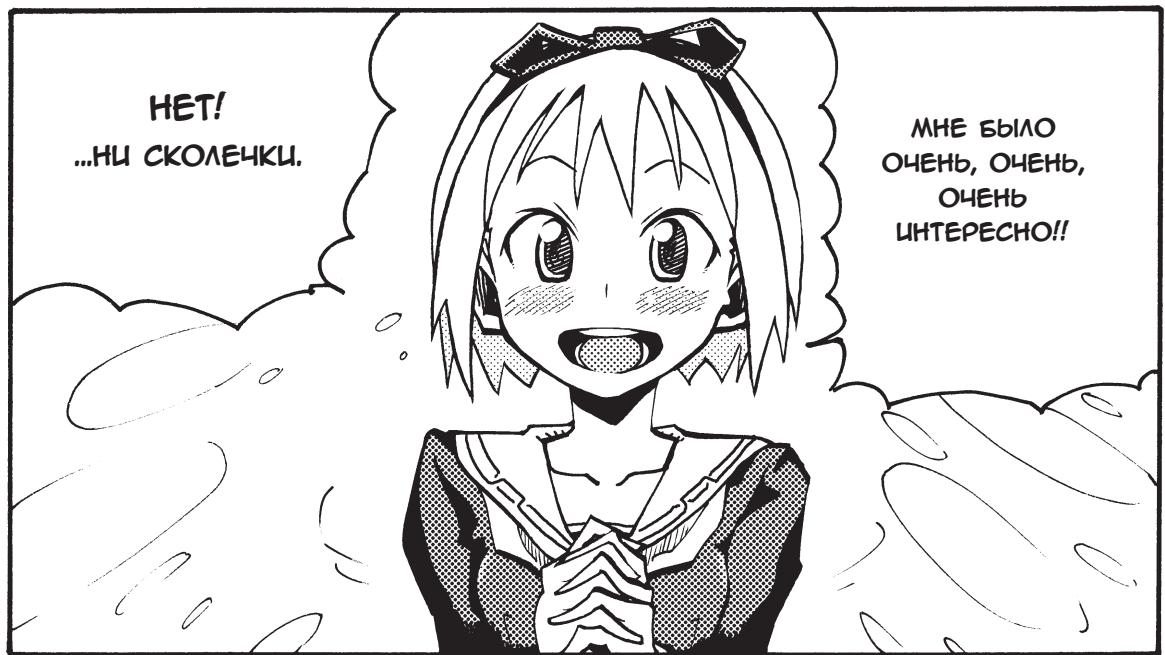
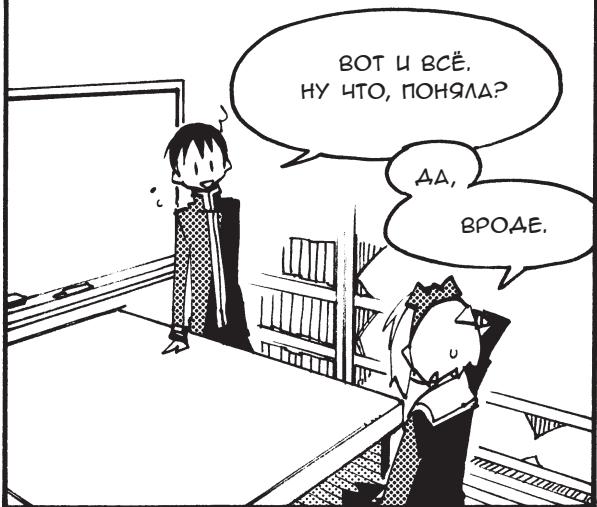
[2] Резонансный усилитель

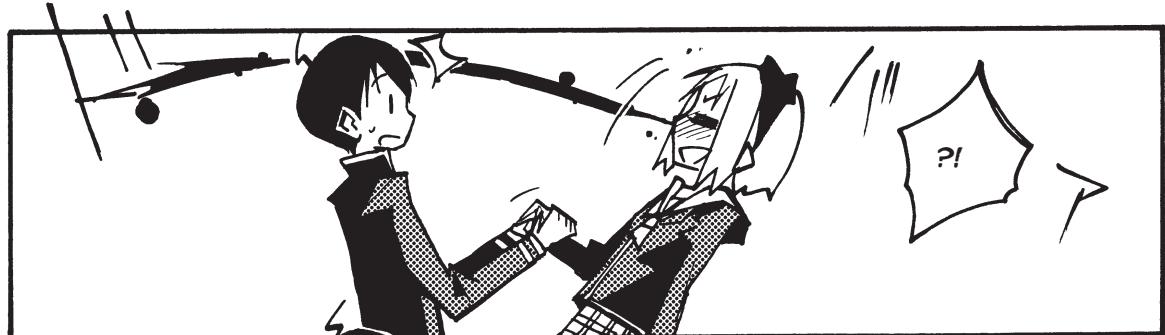
[3] Демодулятор

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









ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ



► Операционный усилитель – совершенная схема усиления

На рис. 1-А1 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-А2, 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-А3, то получится схема, обладающая свойствами **дифференциатора**.

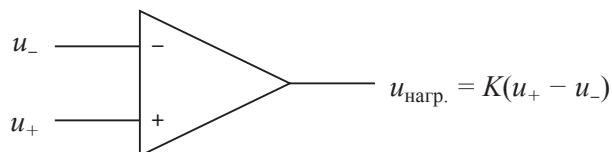


Рис. 1-А1 Обозначение операционного усилителя на схемах

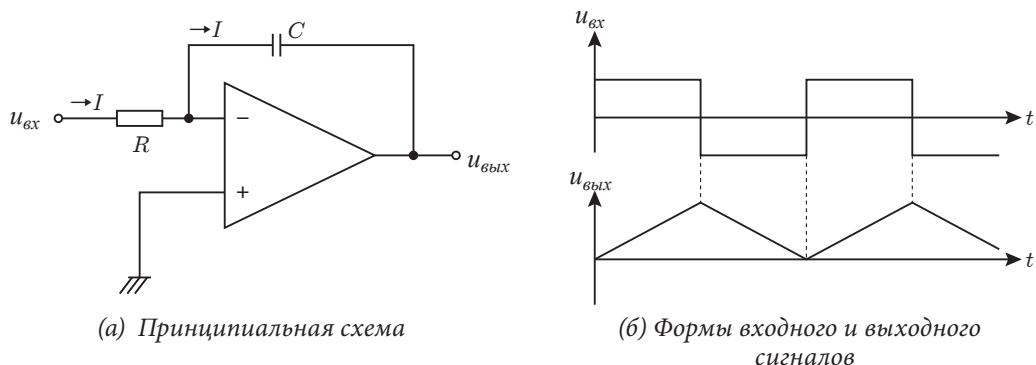


Рис 1-А2 Интегратор

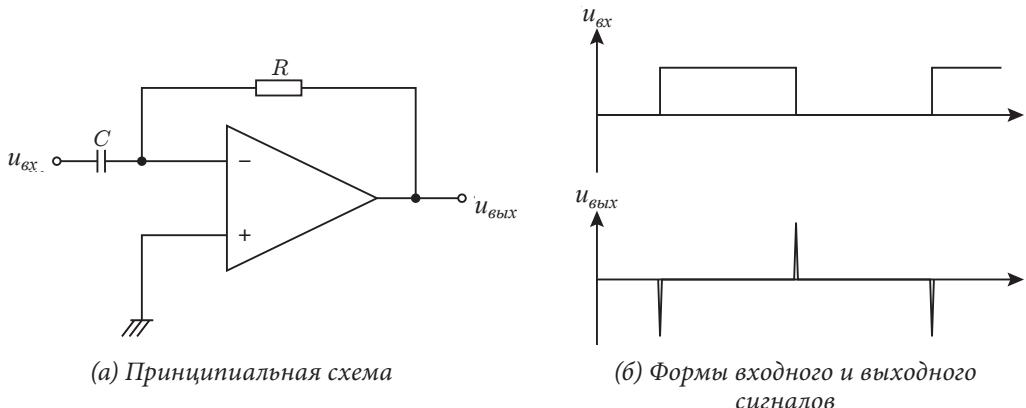


Рис. 1-А3 Дифференциатор

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.

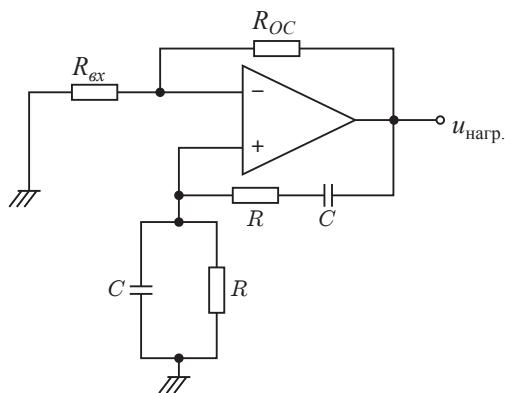


Рис. 1-А4 Генератор с мостом Вина

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**.

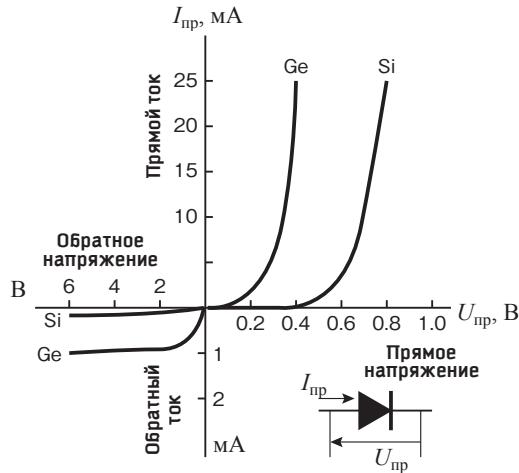


Рис. 1-А5 Диод

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».

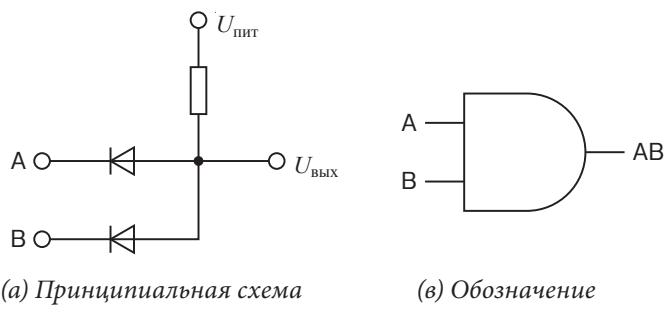


Рис. 1-А6 Логическая схема «И»

На рис. 1-А7 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».

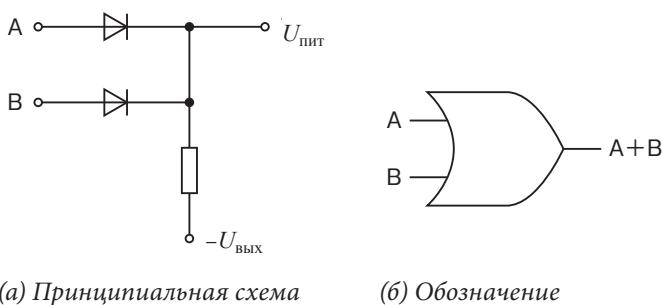


Рис. 1-А7 Логическая схема «ИЛИ»

На рис. 1-А8 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»).

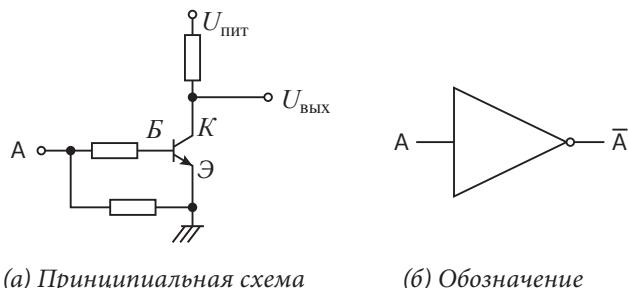


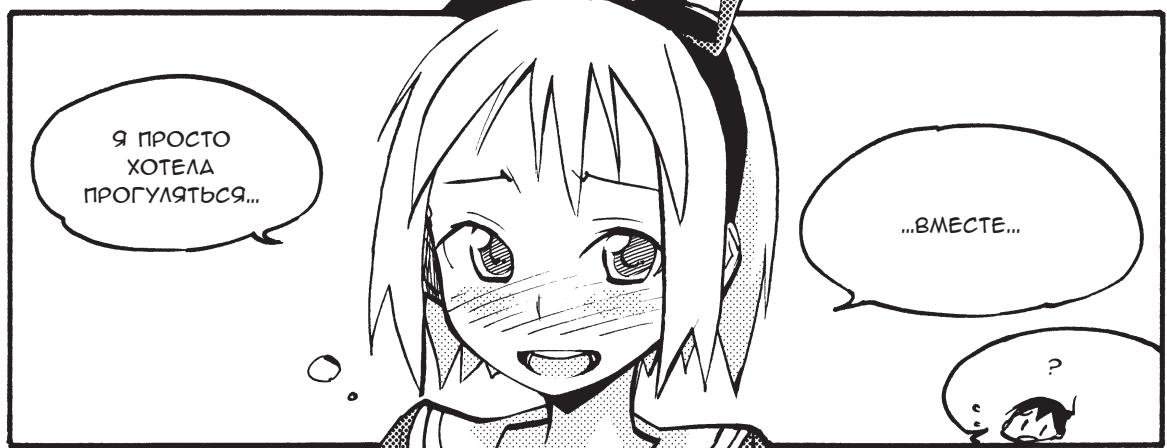
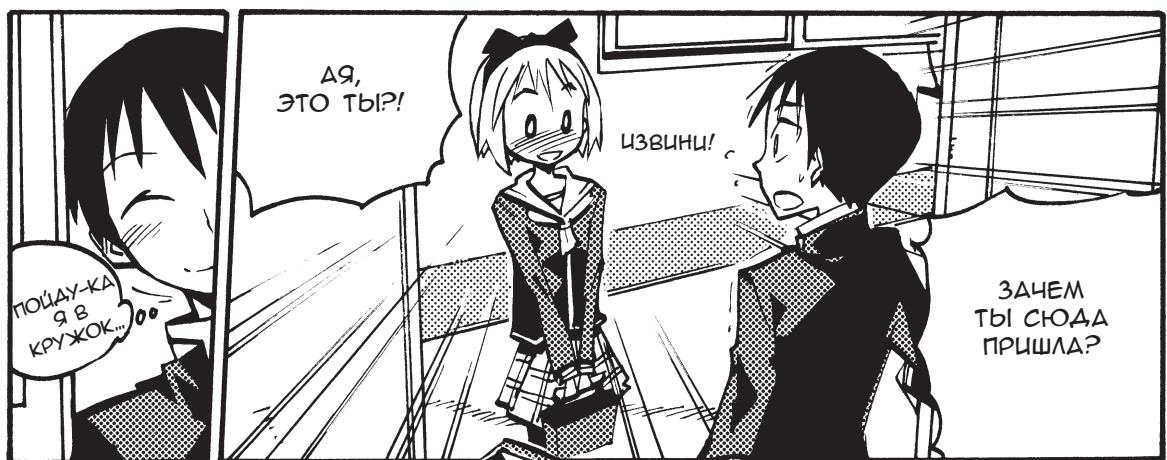
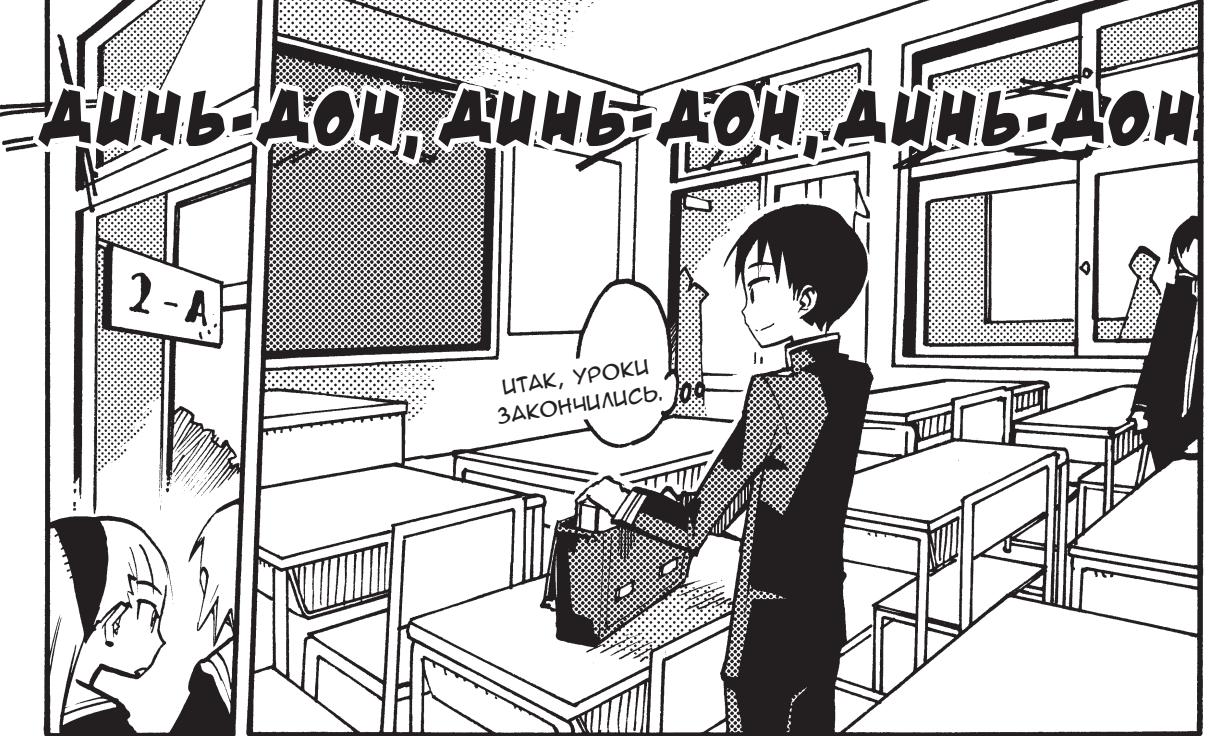
Рис. 1-А8 Логическая схема «НЕ»

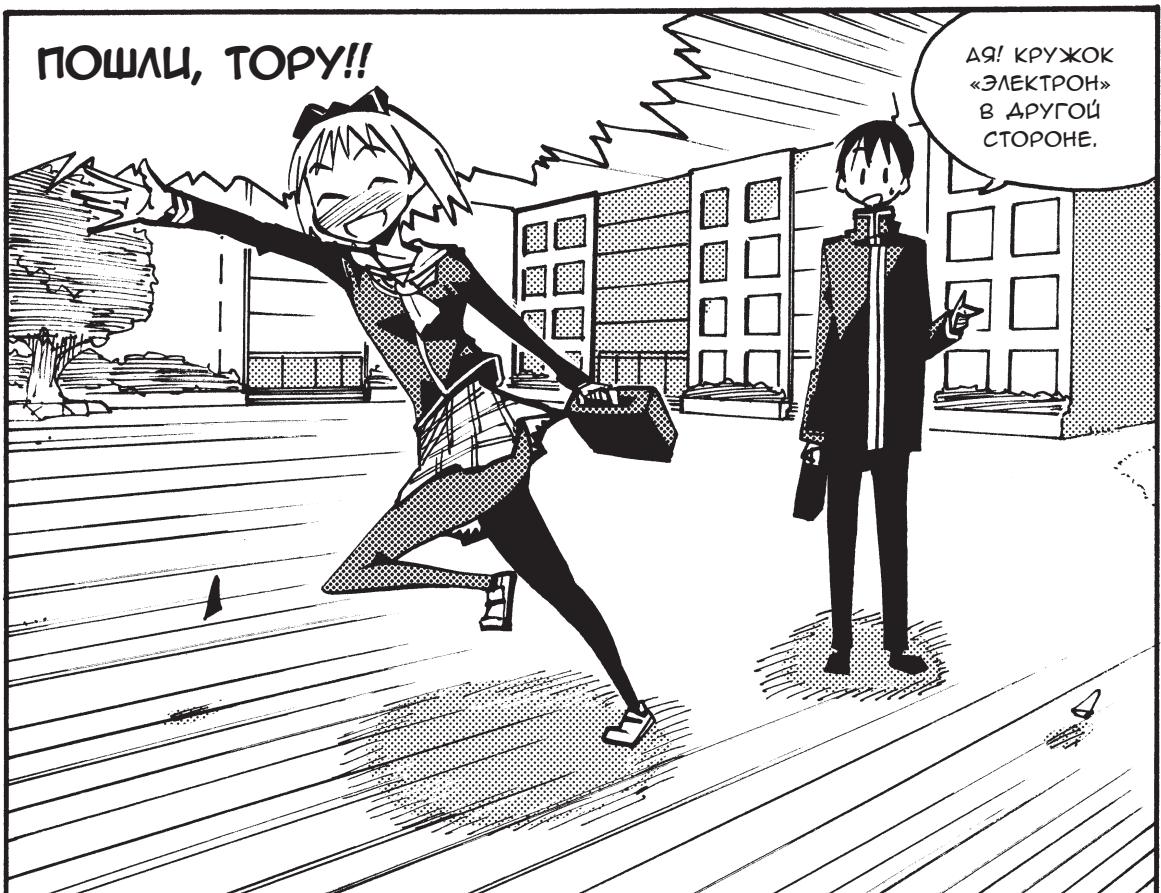
2

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.

ПРОВОДНИКИ

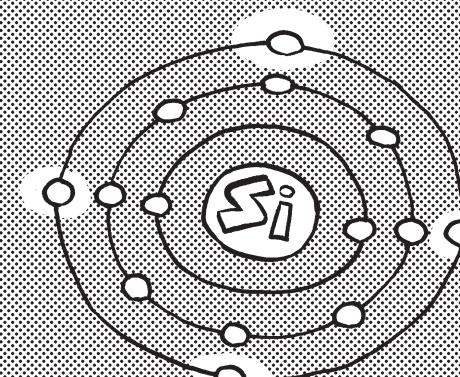
ДИЭЛЕКТРИКИ

А ПОЛУПРОВОДНИКИ - ЭТО
ВЕЩЕСТВА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ
СВОЙСТВАМИ.

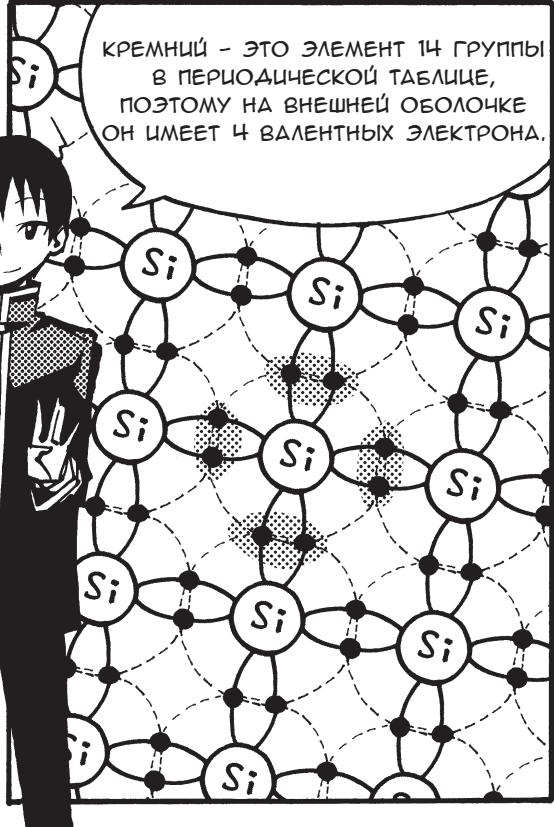
НПРИМЕР, КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТРАНЗИСТОРАХ,
ЯВЛЯЮТСЯ ПОЛУПРОВОДНИКАМИ.

ПРОМЕЖУТОЧ-
НЫМИ...

<Ковалентные связи между атомами кремния>



И КАЖДЫЙ ИЗ АТОМОВ КРЕМНИЯ ПРЕДОСТАВЛЯЕТ СОСЕДНИМ АТОМАМ ПО 4 ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНА - ФОРМИРУЕТСЯ КОВАЛЕНТНЫЙ КРИСТАЛЛ.



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





Группы →

	1																	
↓	H		2															
Периоды	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12								
	Li	Be																
	11	12																
	Mg																	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fo	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113					
	Fr	Ra		Bf	D _b	D _g	Bh	Hs	Mt	D _s	R _d	元素						

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

Элементы

13	14	15	16	17	18
B	C	N	O	F	Ne
Al	Si	P	S	Cl	Ar
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

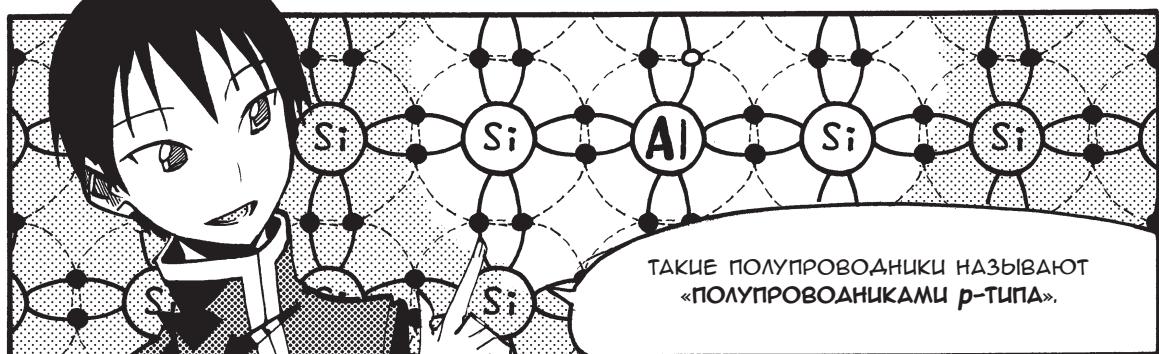
*Лантаноиды

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

**Актиноиды

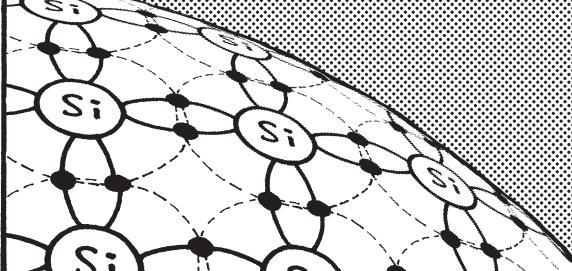
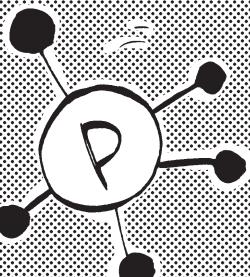
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr





<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!



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

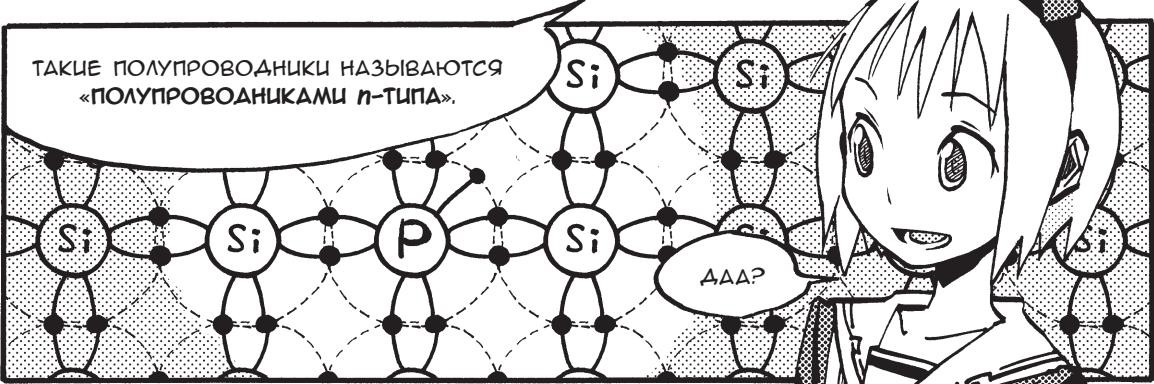
ЭТОТ ЭЛЕКТРОН ЗДЕСЬ ЛИШНИЙ, ПОЭТОМУ ОН ХОЧЕТ БЫТЬ СВОБОДНЫМ.

ПОЭТОМУ В ЭТОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ ТОЖЕ ПОВЫШАЕТСЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ!



ТАКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ НАЗЫВАЮТСЯ «ПОЛУПРОВОДНИКАМИ *n*-типа».

ААА?



2.2. ДИОДЫ С p-n-ПЕРЕХОДОМ



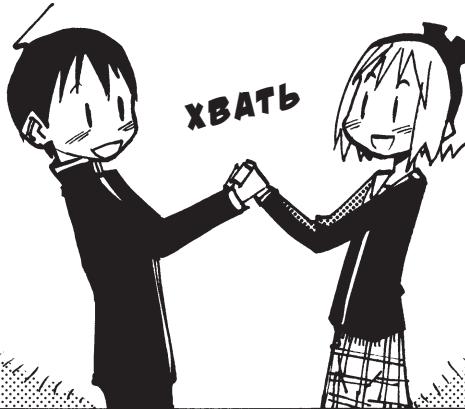
ЕСЛИ СОСТЫКОВАТЬ МЕЖДУ СОБОЙ ПОЛУПРОВОДНИКИ p-типа И ПОЛУПРОВОДНИКИ n-типа, ТО МОЖНО СДЕЛАТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ТАКИЕ КАК ДИОДЫ, ТРАНЗИСТОРЫ. ЭТО МЕСТО СТЫКА НАЗЫВАЕТСЯ p-n-ПЕРЕХОДОМ.



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!!



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



<Напряжение смещения>

А У ЭТИХ АИ...
ДИОДОВ ЕСТЬ
КАКИЕ-НИБУДЬ
ОСОБЕННОСТИ?

ДА.



ДИОДЫ ПРОВОДЯТ ТОК
ТОЛЬКО В ОДНОМ
НАПРАВЛЕНИИ, ТО ЕСТЬ
СОЗДАЮТ «ЭФФЕКТ
ВЫПРЯМЛЕНИЯ».

ВЫПРЯМЛЕНИЕ!

И ЕСЛИ К СТОРОНЕ ДИОДА, ИМЕЮЩЕЙ
р-ТИП, ПОДКЛЮЧИТЬ «ПЛЮС», А К
СТОРОНЕ н-ТИПА – «МИНУС»
ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ, ТО ЧЕРЕЗ ДИОД
ПОТЕЧЁТ ТОК.

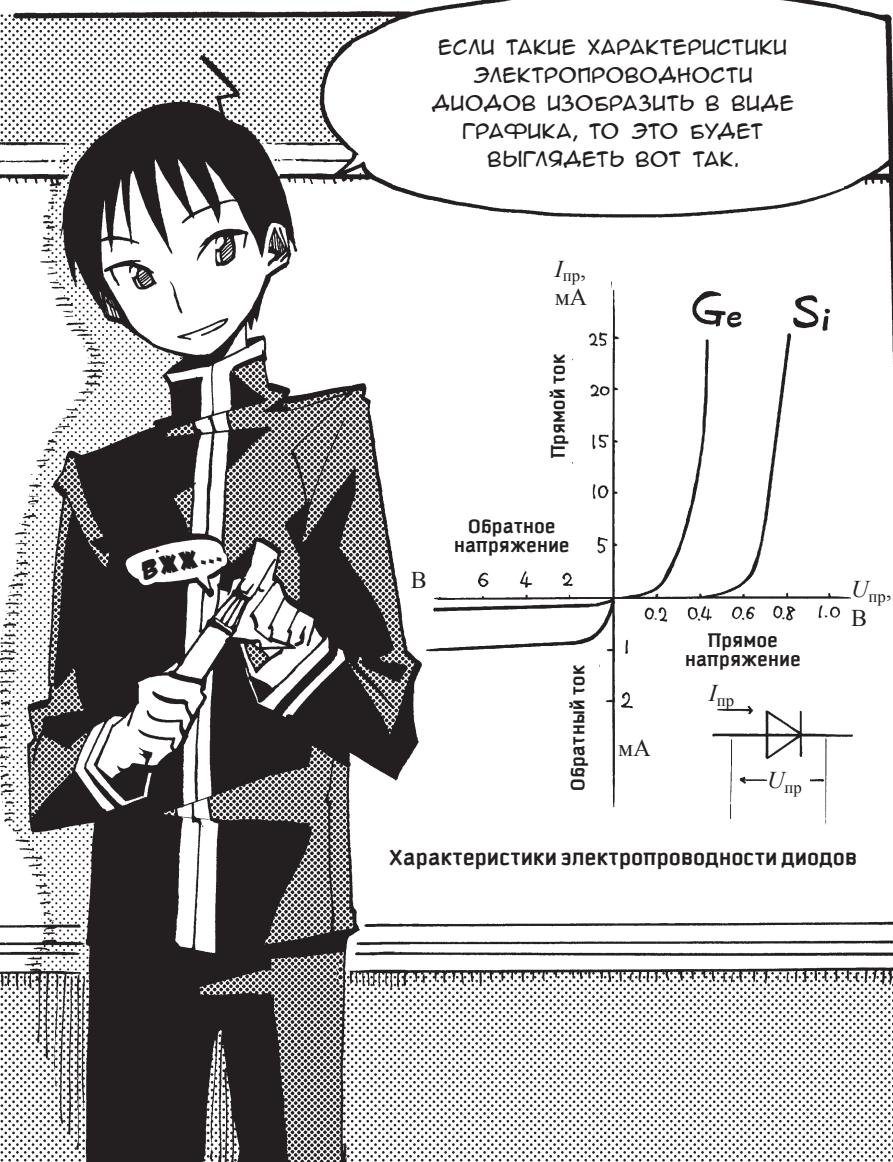
ТОК

р-ТИП

н-ТИП

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ ПОДАЧЕЙ
«НАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОГО СМЕЩЕНИЯ».

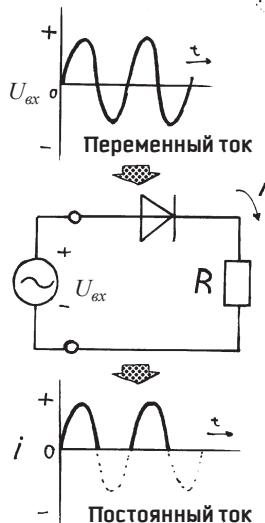
ПОНЯТНО!



<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 «н» в названиях
типов полупроводников?

НЕТ, И ЧТО?

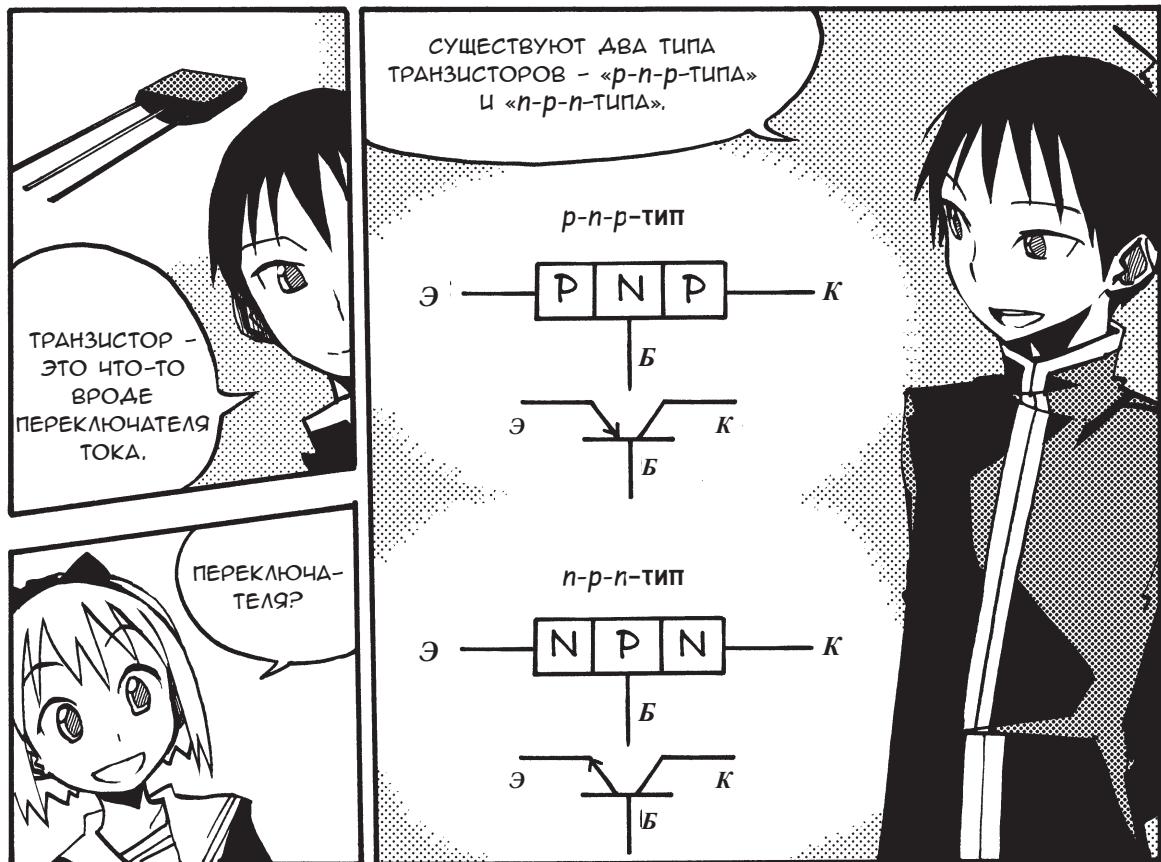
«р» означает «POSITIVE»,
то есть «положительный».
«н» означает «NEGATIVE»,
то есть «отрицательный!»

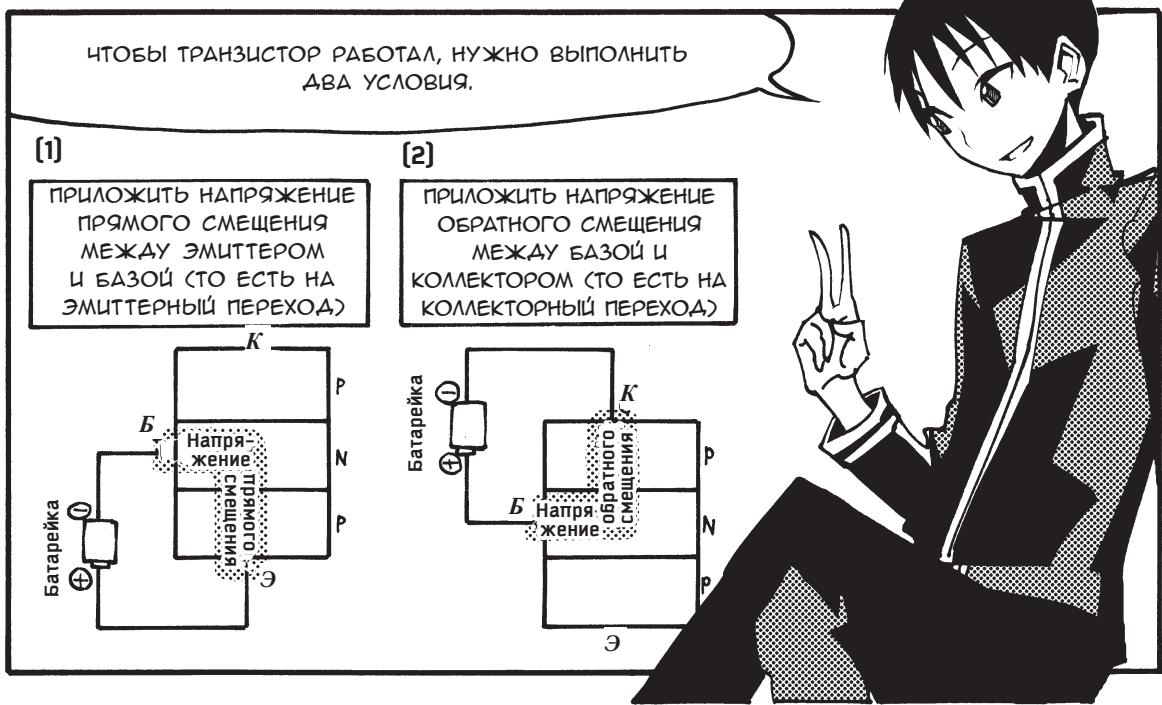
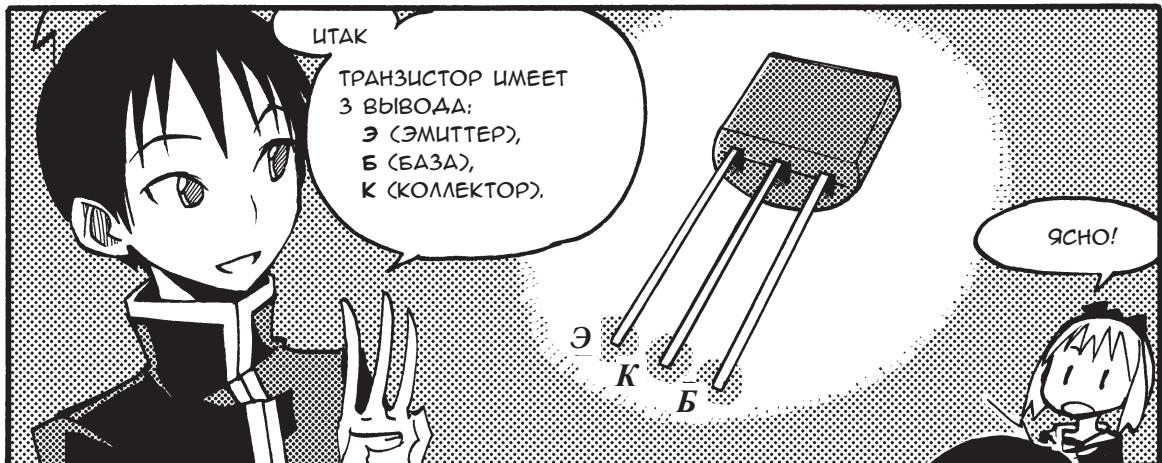
Значит, это позитив

и негатив...?

ну ты
даёшь...

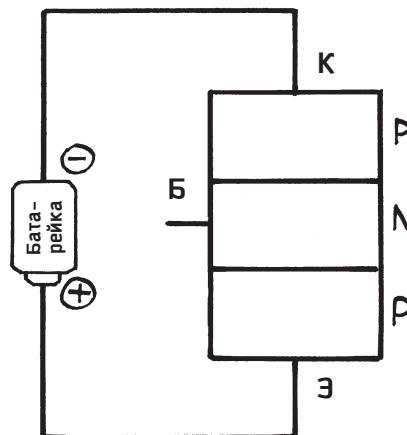
2.2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ





<Транзисторы p-n-p-типа>

ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ
ПОДКЛЮЧИТЬ ТРАНЗИСТОР
p-n-p-типа

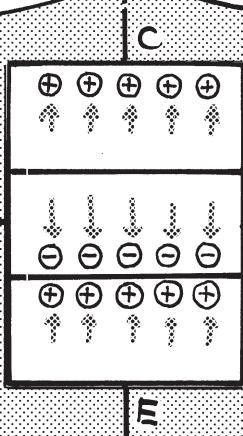


ДЫРКИ ВНУТРИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ
p-типа БУДУТ
ДВИГАТЬСЯ К
МИНУСОВОМУ ПОЛЮСУ
БАТАРЕЙКИ,...

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

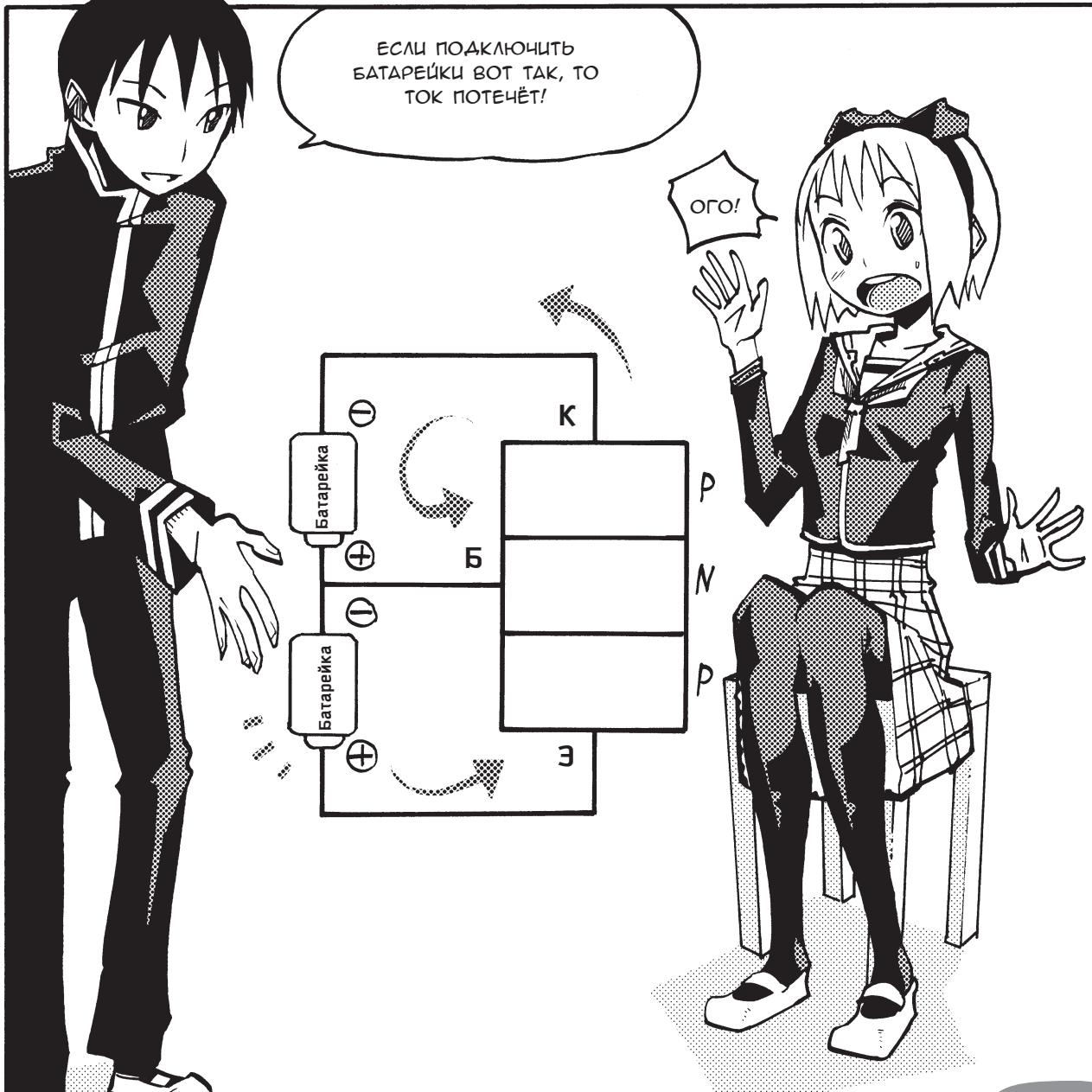
ОДНАКО ЕСЛИ
ОГРАНИЧИТЬСЯ
ТОЛЬКО ЭТИМ,
В ОБЛАСТИ
p-n-ПЕРЕХОДА
МЕЖДУ...

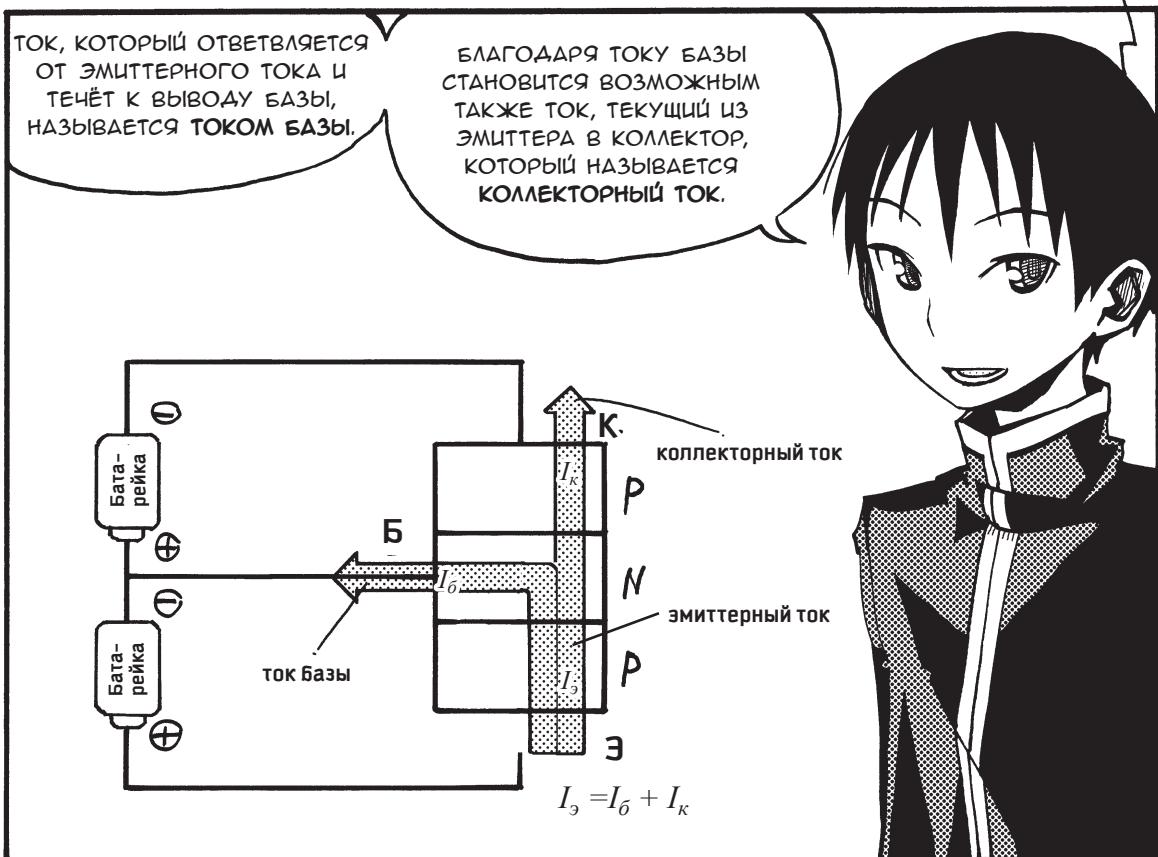
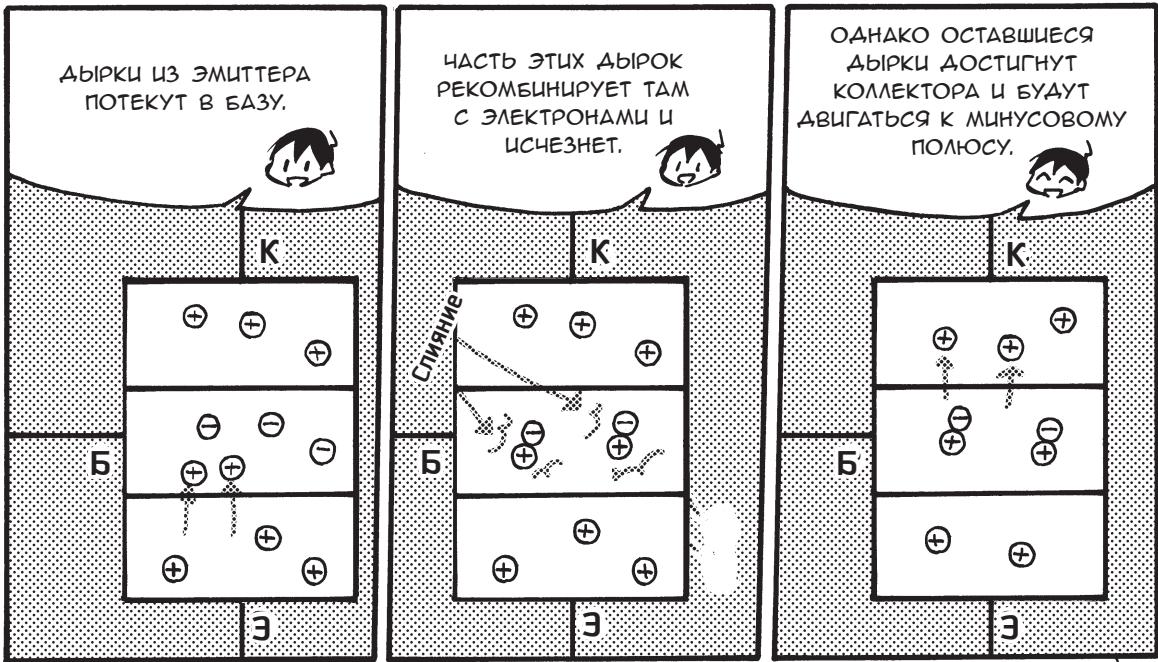
...БАЗОЙ И
КОЛЛЕКТОРОМ (ТО
ЕСТЬ В КОЛЛЕКТОРНОМ
ПЕРЕХОДЕ) СОВСЕМ
НЕ ОСТАНЕТСЯ НИ
ЭЛЕКТРОНОВ, НИ
ДЫРОК.



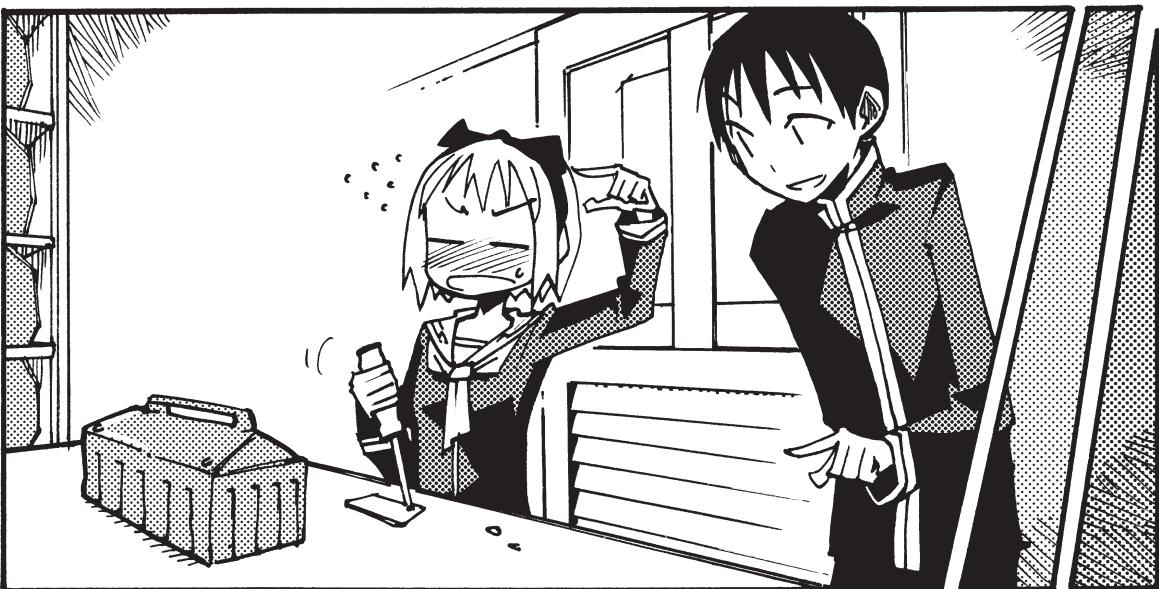
ПОЭТОМУ ТОК
ТЕЧЬ НЕ БУДЕТ.

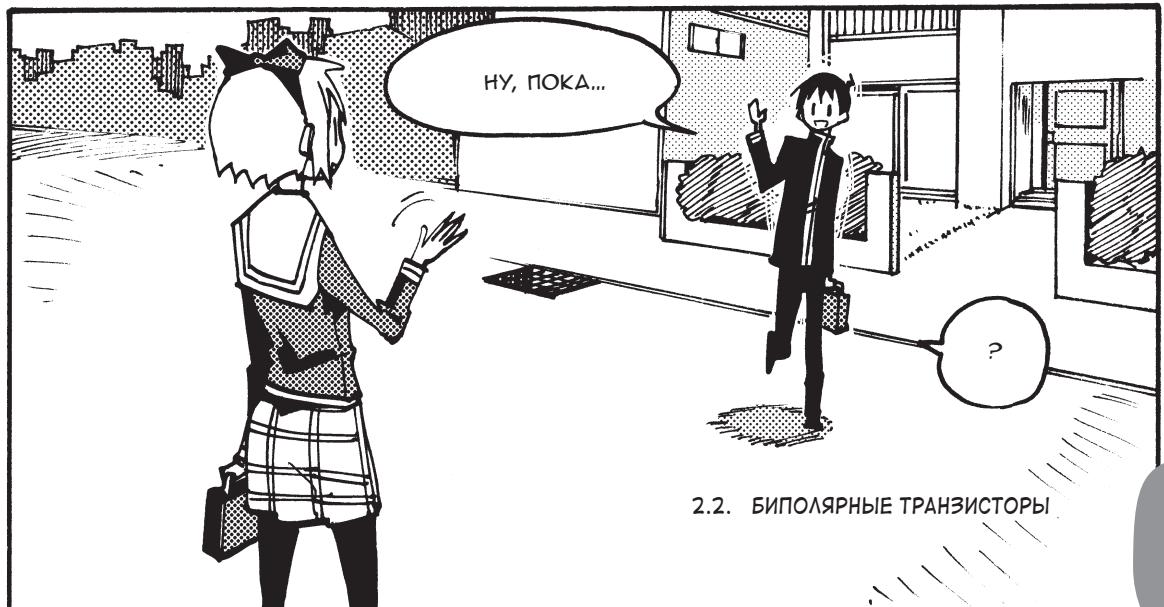
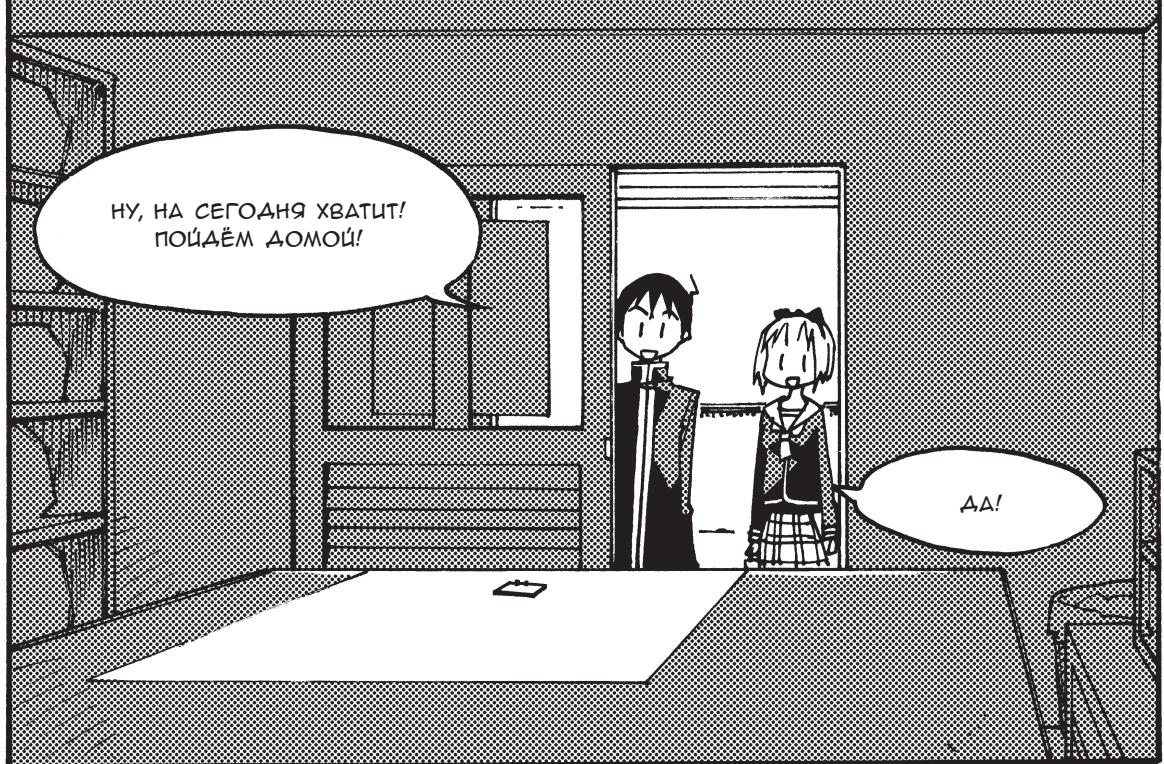


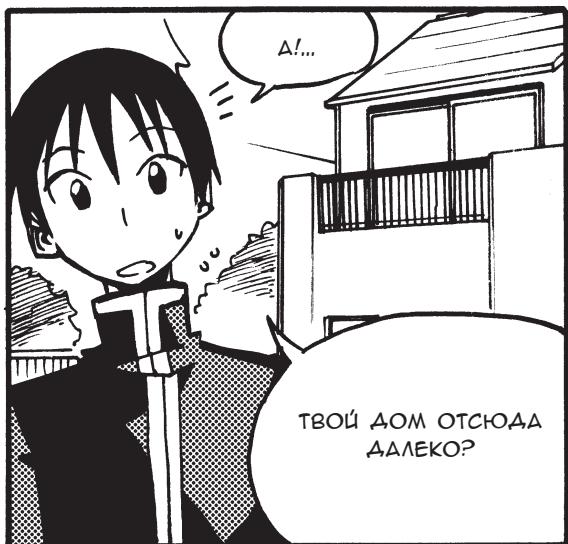


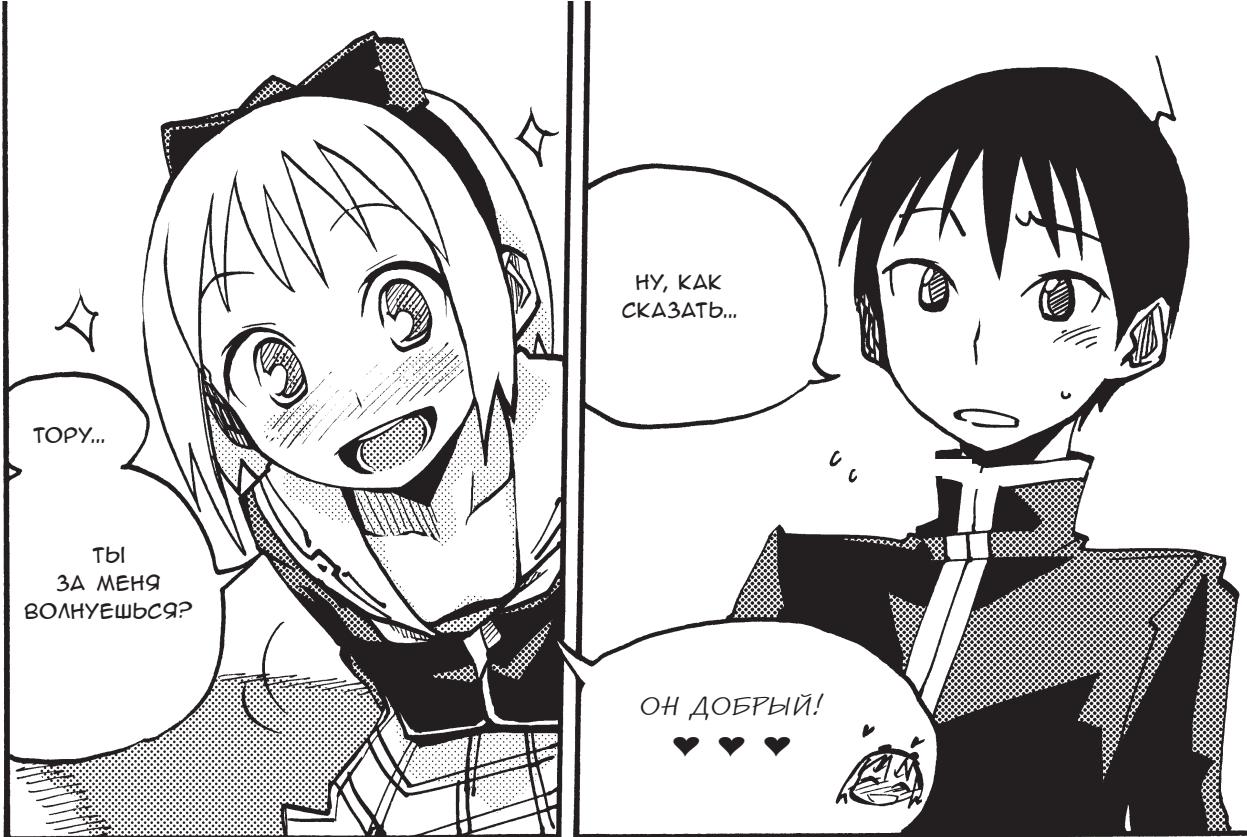




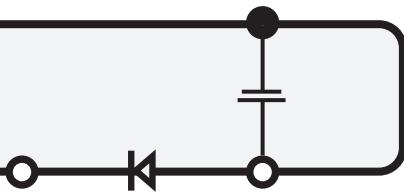








ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ



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).

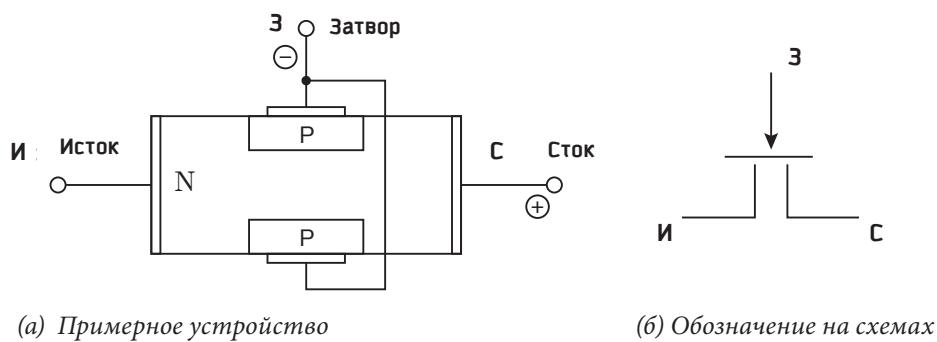


Рис. 2-А1 Устройство ПТУП

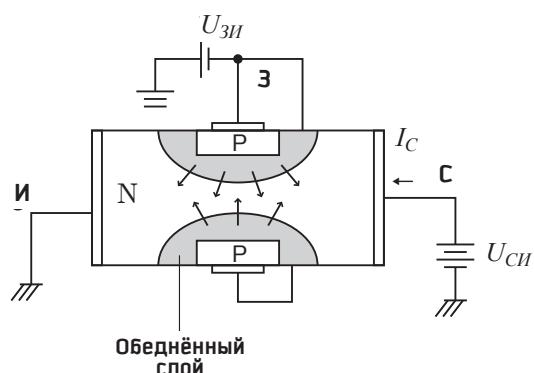


Рис. 2-А2 Принцип действия ПТУП

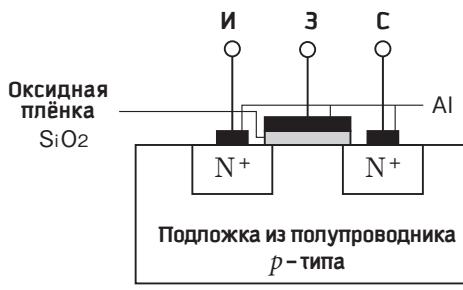
Принцип действия ПТУП показан на рис. 2-А2. Сначала мы прикладываем напряжение обратного смещения (напряжение, обеспечивающее работу транзистора) между затвором и истоком. Благодаря этому, в области перехода между полупроводником *p*-типа (затвор) и полупроводником *n*-типа (*n*-канал) формируется обеднённый 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.

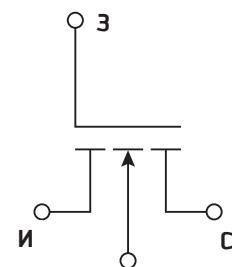
Важным свойством ПТУП является почти полное отсутствие тока, текущего через затвор, что позволяет управлять током стока с помощью напряжения затвора.

▶ 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.



(a) 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 пленка (двуокись кремния – SiO_2).

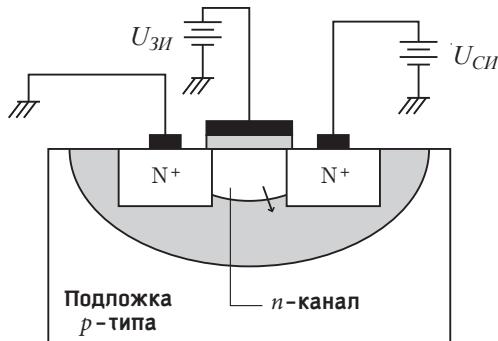


Рис. 2-А4 Принцип действия ПТ МОП

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 пленку** (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 пленки** 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 **унипольярными транзисторами** («уни-» указывает на «один»).

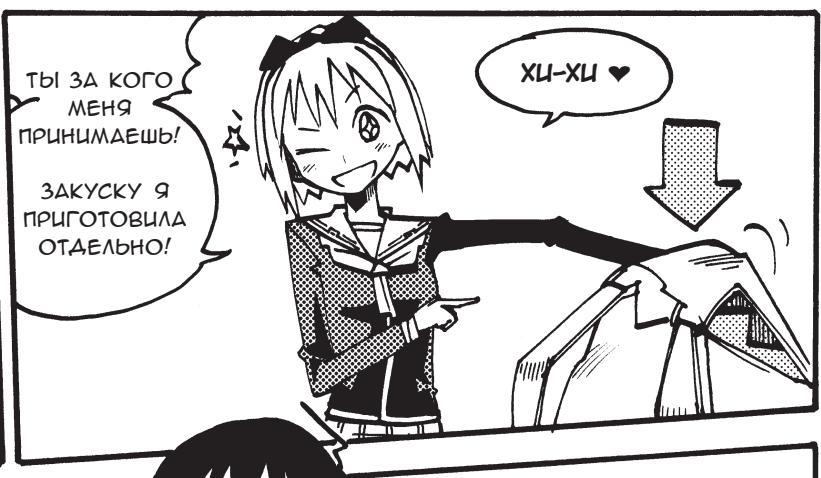
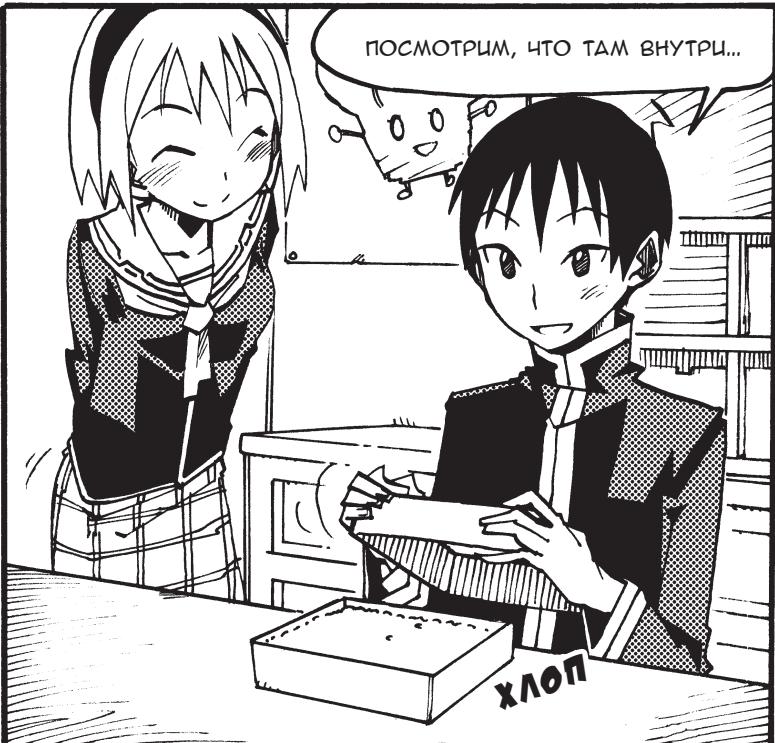
Кроме того, биполярный транзистор – это **элемент, управляемый током**, так как в нём с помощью тока базы управляют коллекторным током. В противоположность этому, унипольярные транзисторы – это **элементы, управляемые напряжением**, так как в них током стока управляют с помощью **напряжения затвора**.

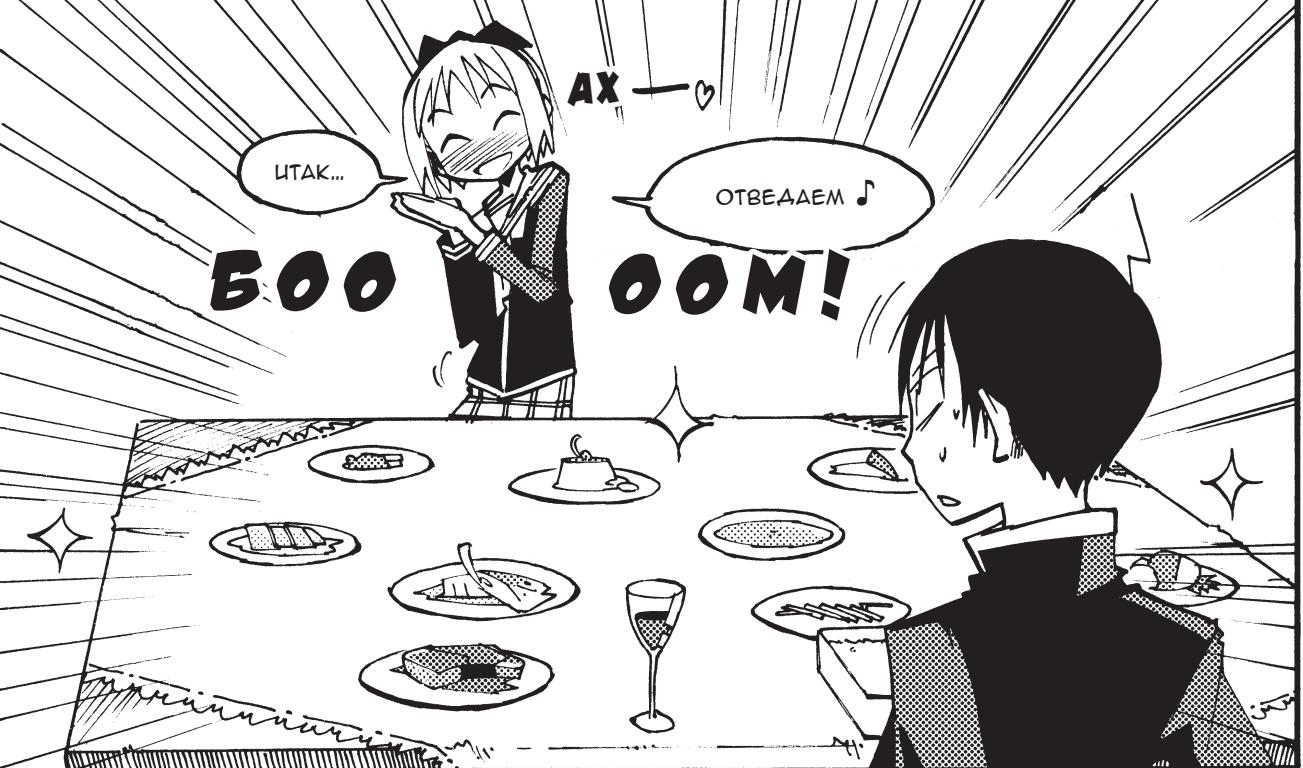
3
ГЛАВА

СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ











3.1. ПРАВИЛА КИРХГОФА

<Анализ цепей>

ДА, ЗНАНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ НЕОБХОДИМЫ. НУ, ПО КРАЙНЕЙ МЕРЕ, «ПРАВИЛА КИРХГОФА» НЕ МЕШАЛО БЫ ЗАПОМНИТЬ.

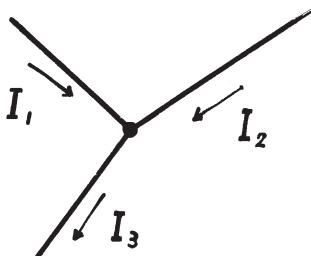
ЧТО КИРХ...
ЧТО ЭТО ТАКОЕ?



<Первое и второе правила Кирхгофа>

ПЕРВОЕ ПРАВИЛО
КИРХГОФА
ФОРМУЛИРУЕТСЯ ТАК:

СУММА ТОКОВ,
ВХОДЯЩИХ В ОДИН
УЗЕЛ, РАВНА НУЛЮ.

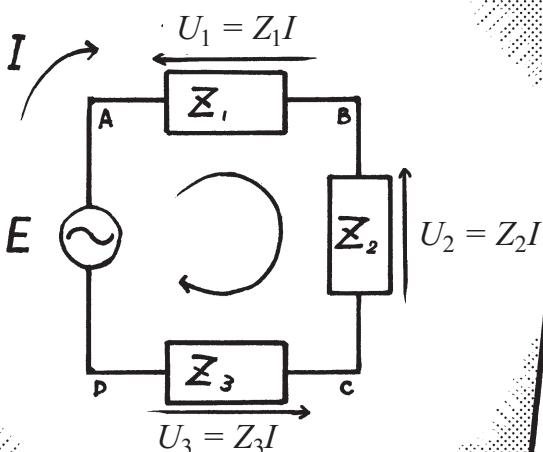


СОГЛАСНО ЭТОМУ ПРАВИЛУ,
СУММА ТОКОВ I_1 И I_2 ,
ВХОДЯЩИХ В СРЕДНЮЮ
ТОЧКУ НА ЭТОЙ СХЕМЕ,
РАВНА ТОКУ I_3 , ВЫХОДЯЩЕМУ
ИЗ СРЕДНЕЙ ТОЧКИ.

ЭТО ЕЩЁ НАЗЫВАЮТ
ЗАКОНОМ
СОХРАНЕНИЯ ТОКА.



ТЕПЕРЬ ВЗГЛЯНЕМ НА ЭТУ СХЕМУ.



ОЙ, ЧТО ЭТО?

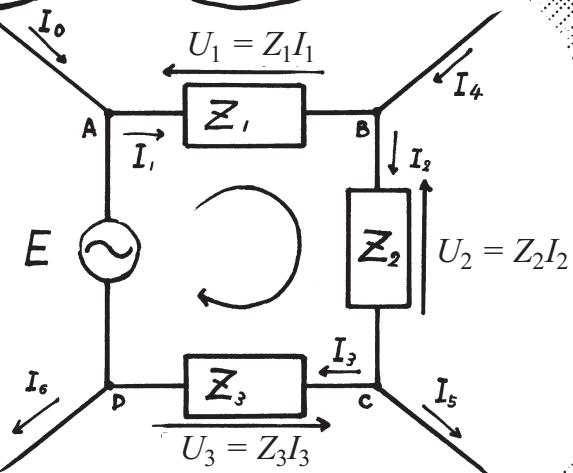
ЭТА СХЕМА
ИЛЛЮСТРИРУЕТ
ВТОРОЕ ПРАВИЛО
КИРХГОФА:

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*I , Z_2*I И Z_3*I ,
СООТВЕТСТВЕННО.



В качестве общего случая рассмотрим контур с узлами, из которых идут ветви.

Чем этот контур отличается от контура на предыдущей странице?



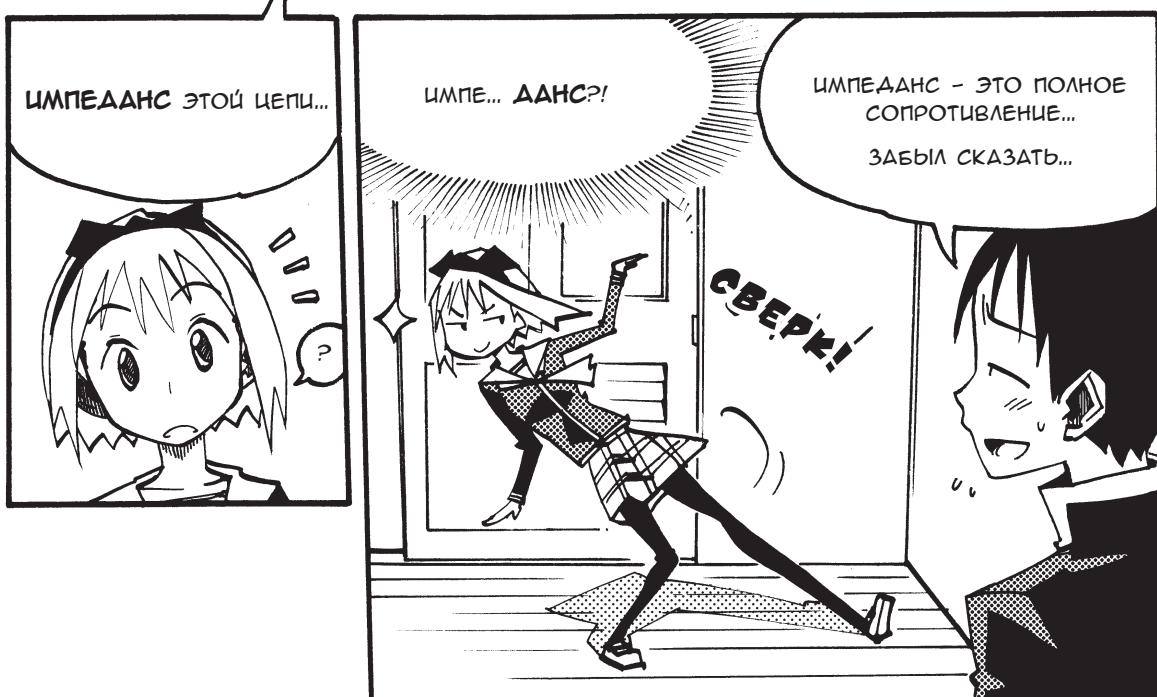
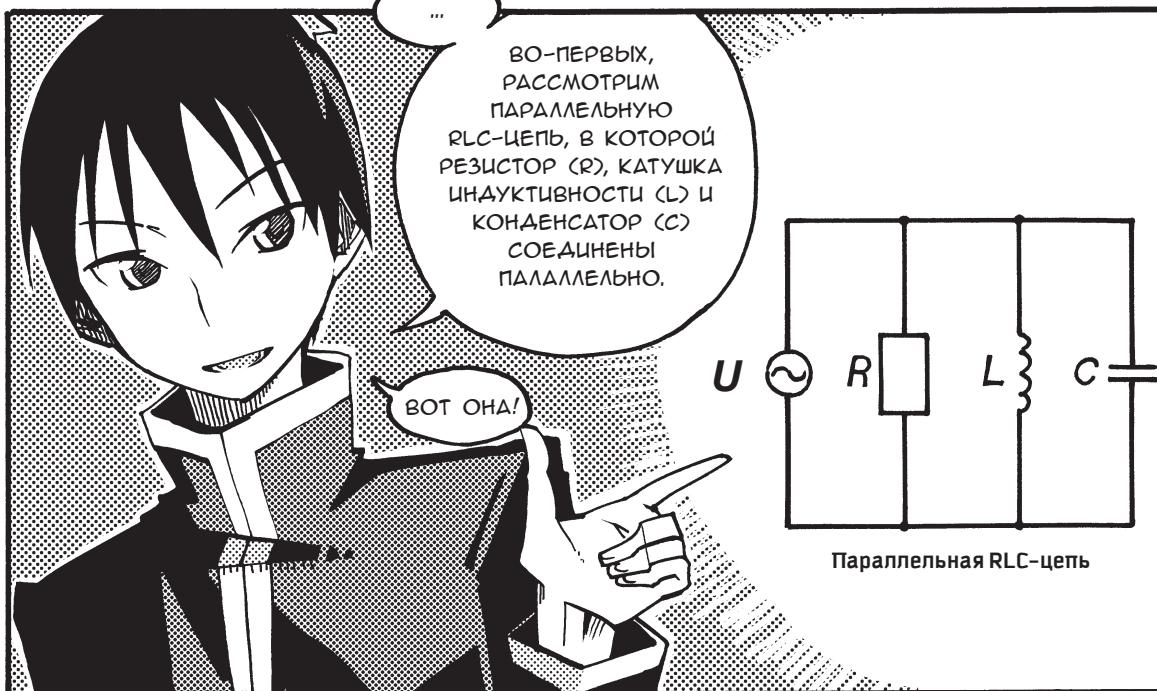
В нём есть узлы
A, B, C и D, из
которых идут ветви...
и токи здесь
другие.

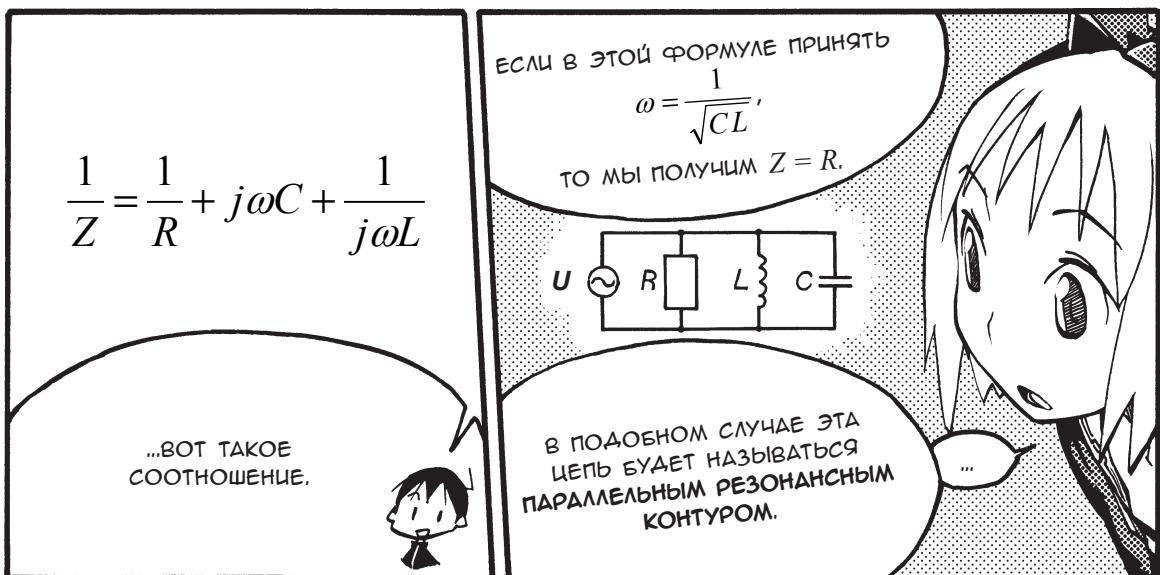
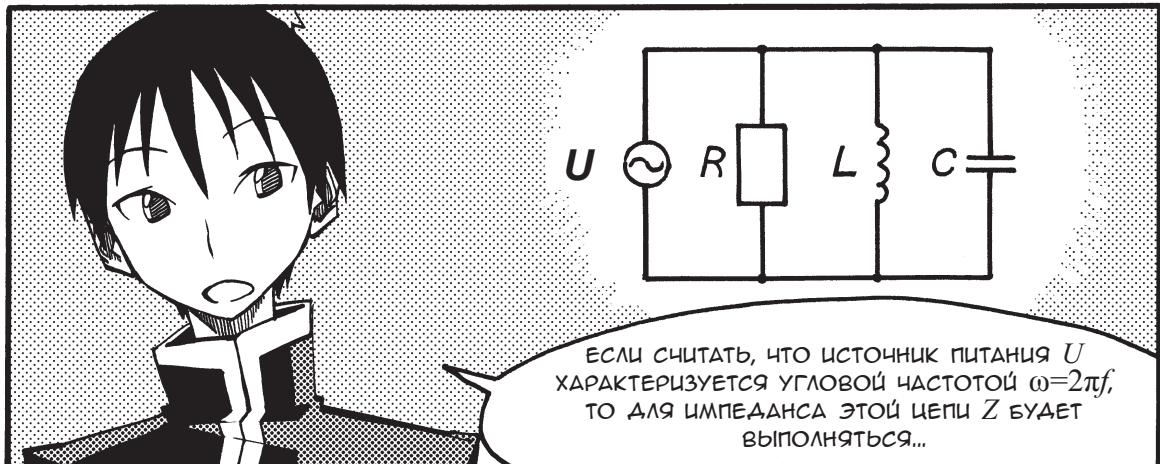
ДА, ПРАВИЛЬНО!

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 $Z_1 * I_1$, $Z_2 * I_2$ И
 $Z_3 * I_3$, СООТВЕТСТВЕННО.

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
«ВТОРОЕ ПРАВИЛО
КИРХГОФА».

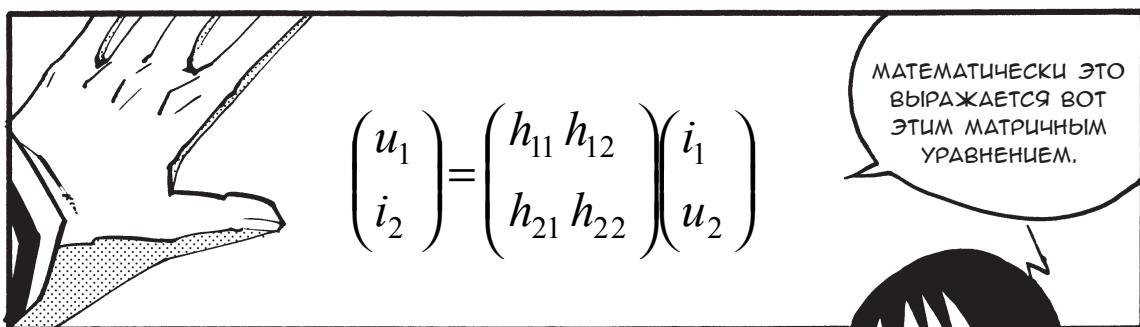
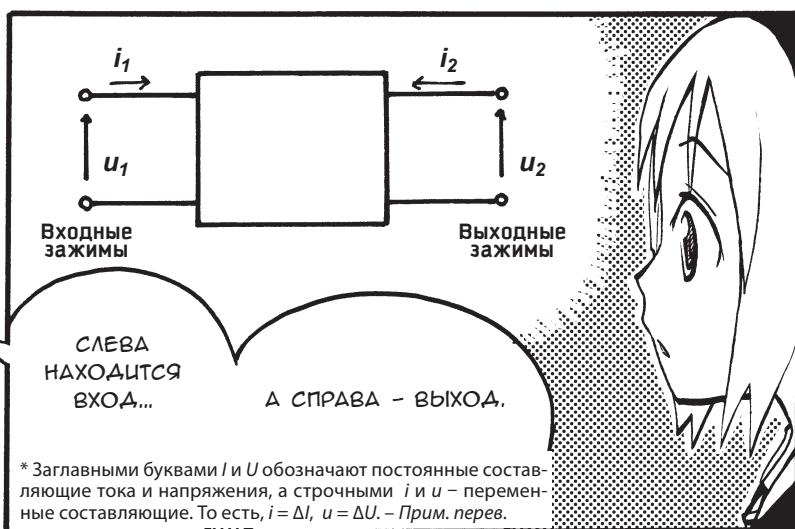
3.2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ RLC-ЦЕПИ



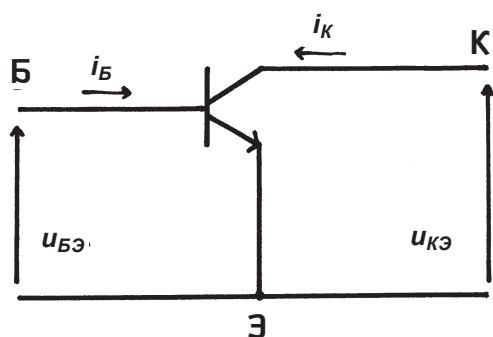


3.3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА С h -ПАРАМЕТРАМИ

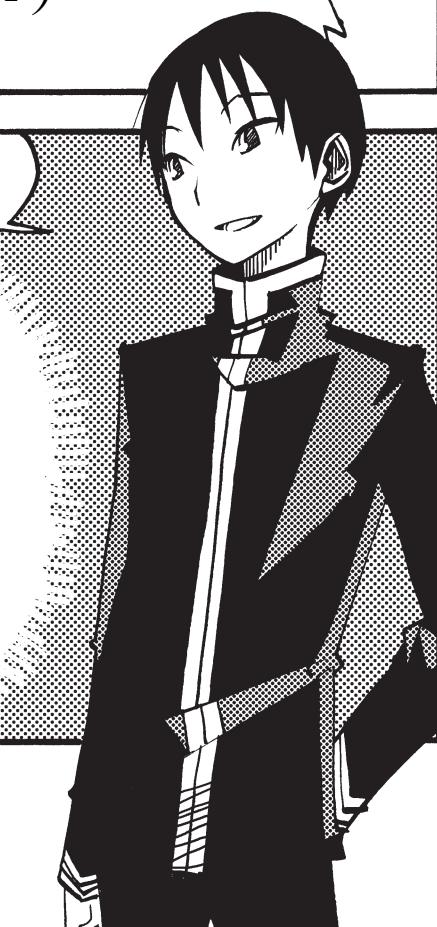




А ЕСЛИ ЭТУ ФОРМУЛУ ИЗОБРАЗИТЬ В ВИДЕ СХЕМЫ, МЫ ПОЛУЧИМ «ЭКВИВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ с h -ПАРАМЕТРАМИ». ЭТО, ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРА.



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.

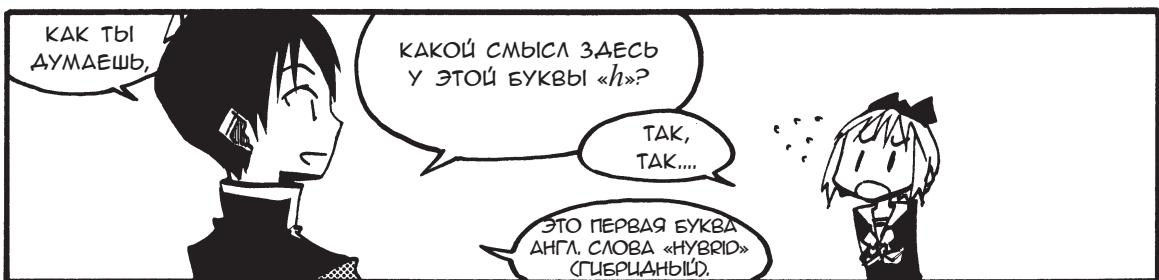
ДА?

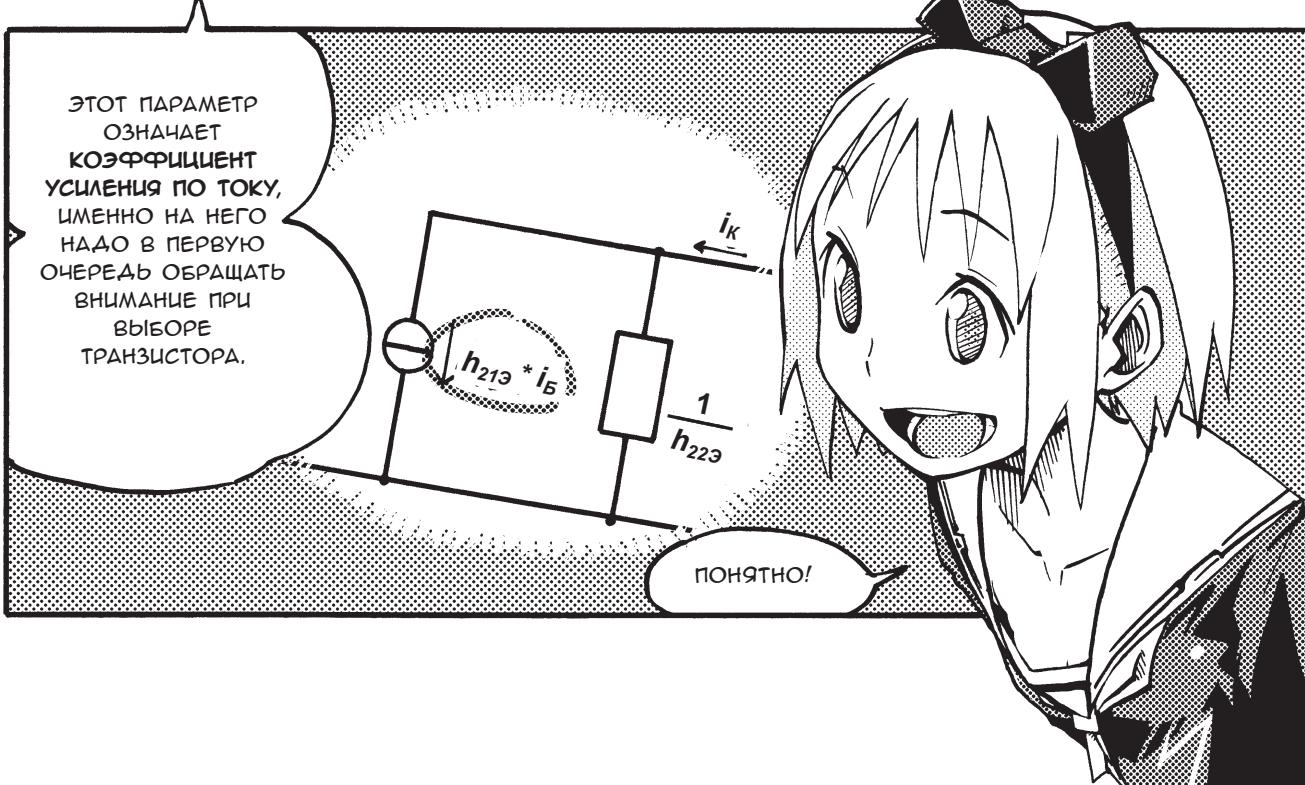
h_{11} – ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_i ОТ АНГЛ. СЛОВА «INPUT» – ВХОД). ЭТО ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ИЗМЕРЕННОЕ СО СТОРОНЫ ВХОДНЫХ ЗАЖИМОВ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ НА ВЫХОДЕ ($u_2 = \Delta U_2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

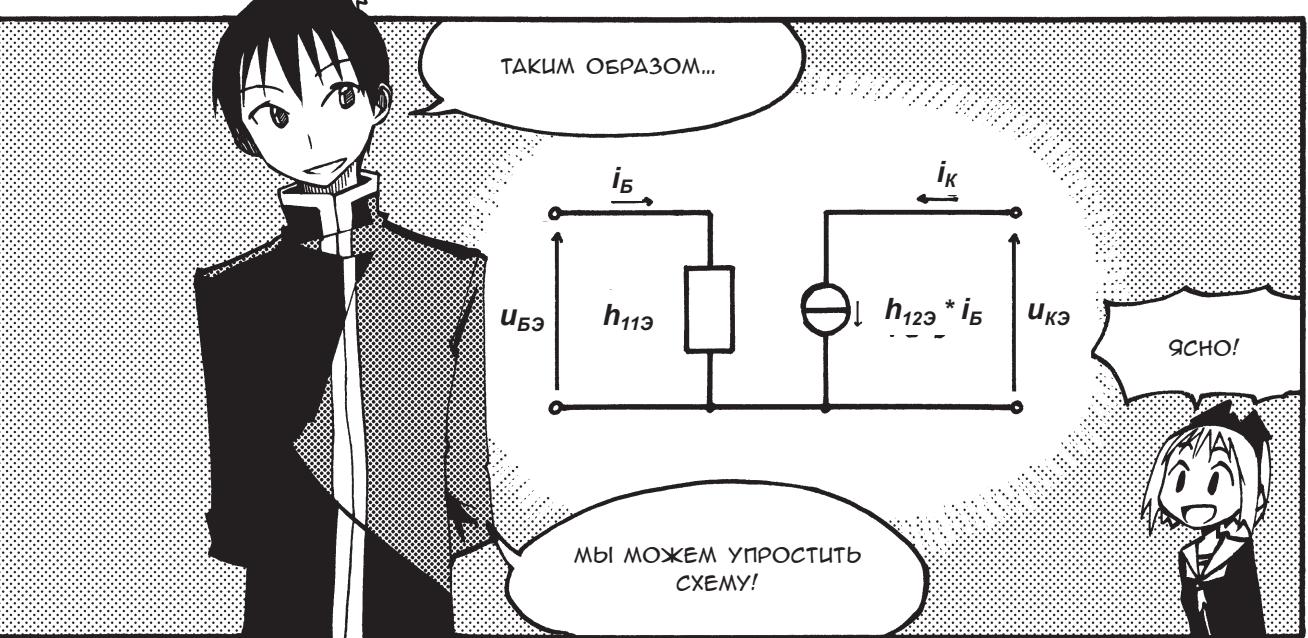
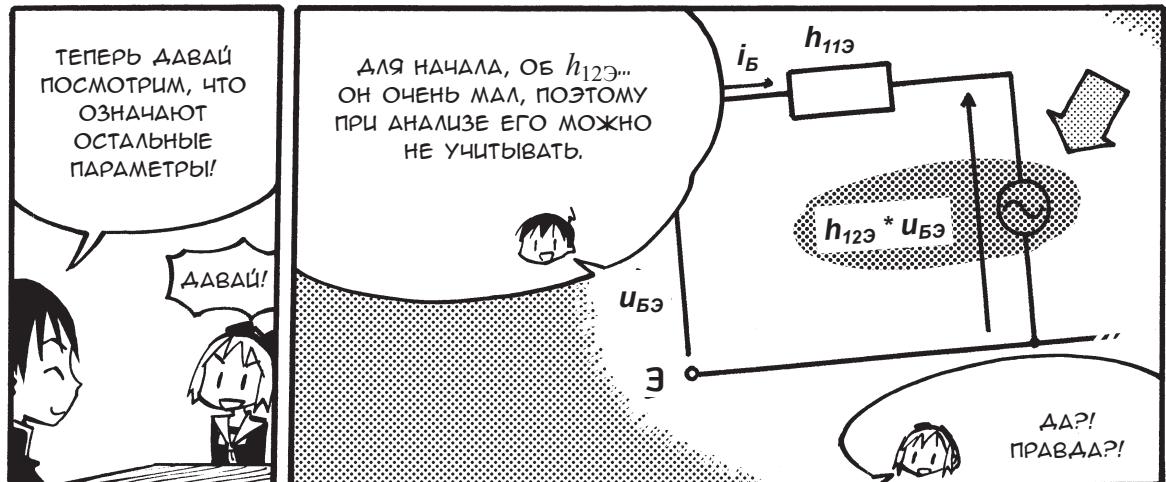
h_{12} – КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_r ОТ АНГЛ. СЛОВА «REVERSE», УКАЗЫВАЮЩЕГО НА ОБРАТНУЮ ПЕРЕДАЧУ – ОТ ВЫХОДА К ВХОДУ). ЭТО ОТНОШЕНИЕ ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ К ВЫХОДНОМУ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ ХОЛОСТОГО ХОДА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

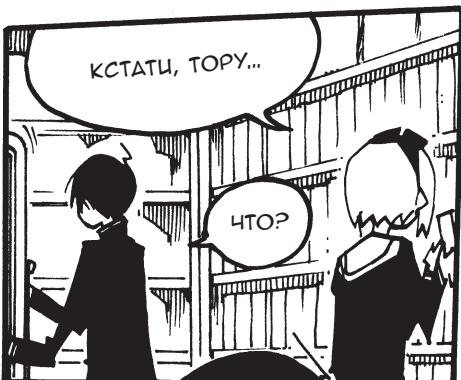
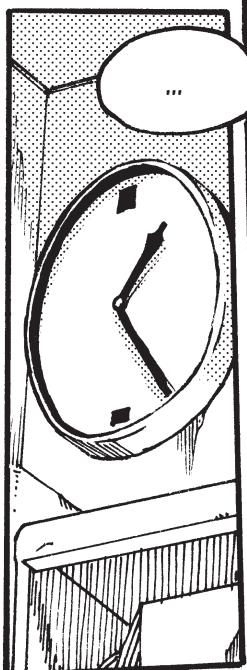
h_{21} – КОЭФФИЦИЕНТ ПРЯМОЙ ПЕРЕДАЧИ ТОКА (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_f ОТ АНГЛ. СЛОВА «FORWARD», УКАЗЫВАЮЩЕГО НА ПРЯМОЮ ПЕРЕДАЧУ – ОТ ВХОДА К ВЫХОДУ). ЭТО ОТНОШЕНИЕ ВЫХОДНОГО ТОКА К ВХОДНОМУ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ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

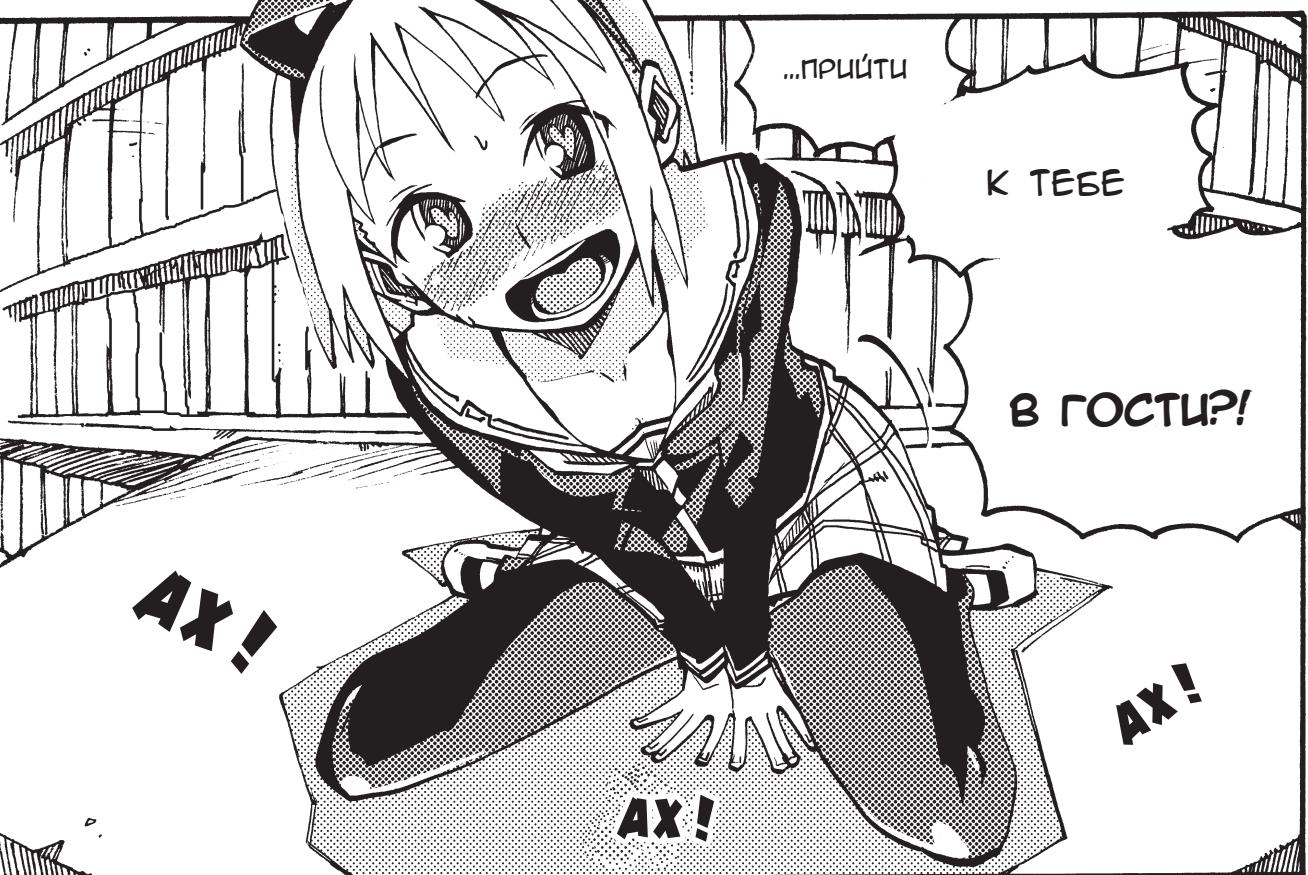
h_{22} – ВЫХОДНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ (В ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ИНОГДА ОБОЗНАЧАЕТСЯ h_o ОТ АНГЛ. СЛОВА «ОУТРIT» – ВЫХОД). ЭТО ВЕЛИЧИНА, ОБРАТНАЯ ПОЛНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ, ИЗМЕРЕННОМУ СО СТОРОНЫ ВЫХОДНЫХ ЗАЖИМОВ. КАК ВИДНО ИЗ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ, ОНО ИЗМЕРЯЕТСЯ ПРИ УСЛОВИИ ХОЛОСТОГО ХОДА ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ НА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











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.



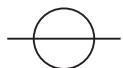
Источник напряжения постоянного тока



Источник напряжения переменного тока

Рис. 3-А1 Принятые обозначения источников питания

На рис. 3-А2 изображены идеальные источники питания. Если у идеального источника напряжения $i = 0$, то его можно считать закороченным (то есть заменённым перемычкой), а при $i \neq 0$ 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:

$$A_{i1} = \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}}$$
$$A_{i1} = 20 \log_{10} \left| \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}} \right| [\text{дБ}]$$

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

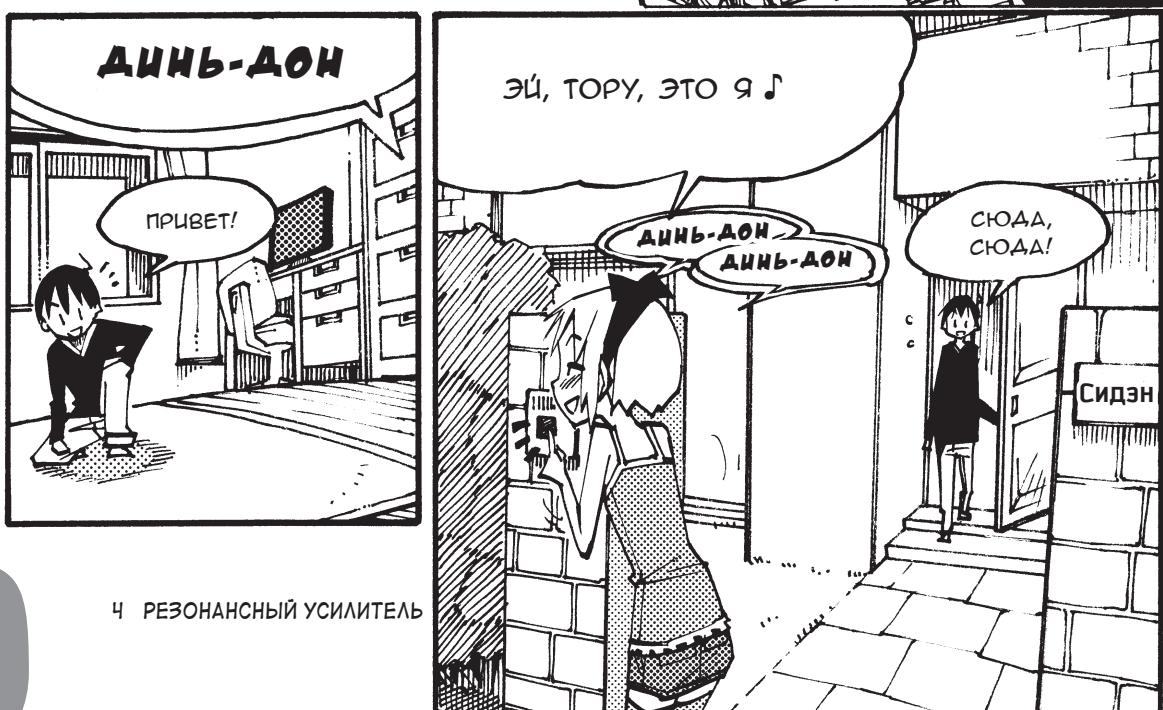
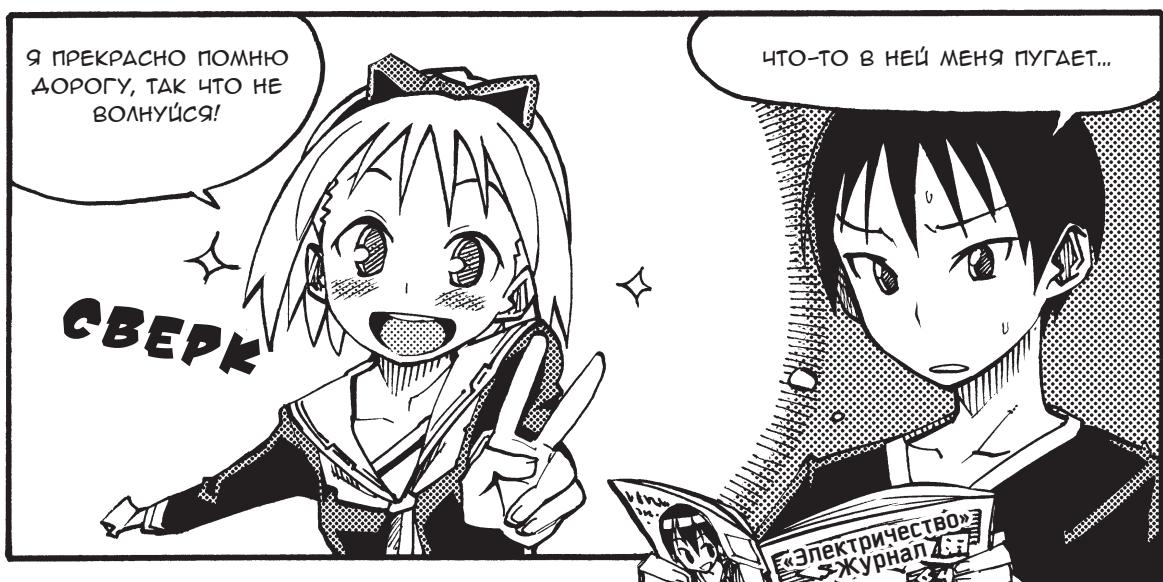
При использовании комплексных чисел, например, в математике, используется соглашение $\sqrt{-1} = i$, однако в таких областях, как электротехника и электроника, для комплексных чисел используется $\sqrt{-1} = j$. Это позволяет избежать путаницы, так как буквой « i » принято обозначать ток. В этой книге,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

4

ГЛАВА

РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ







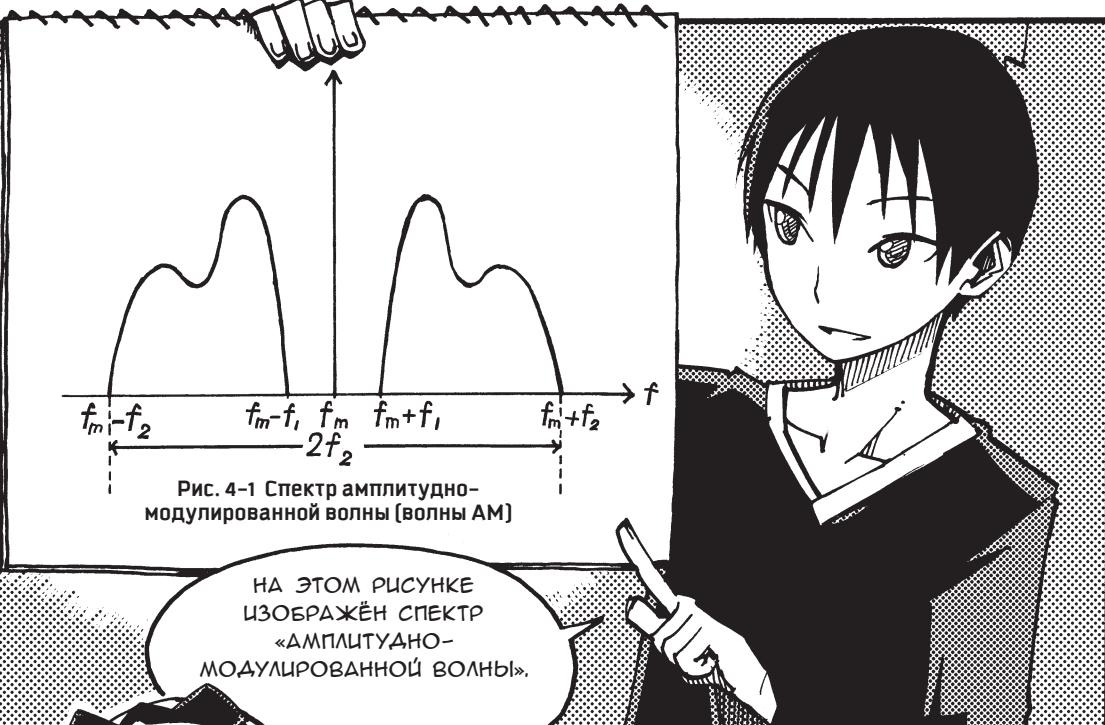


4.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

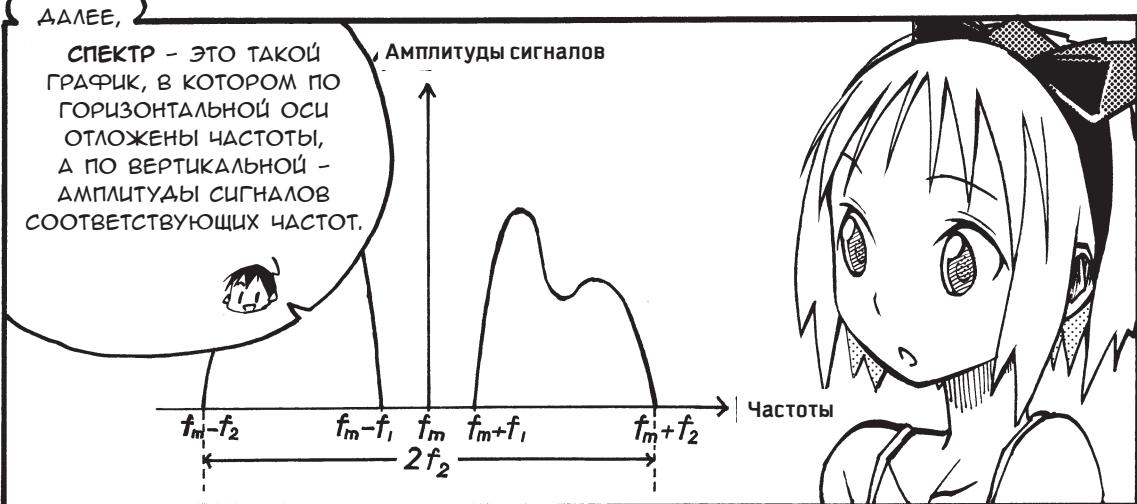
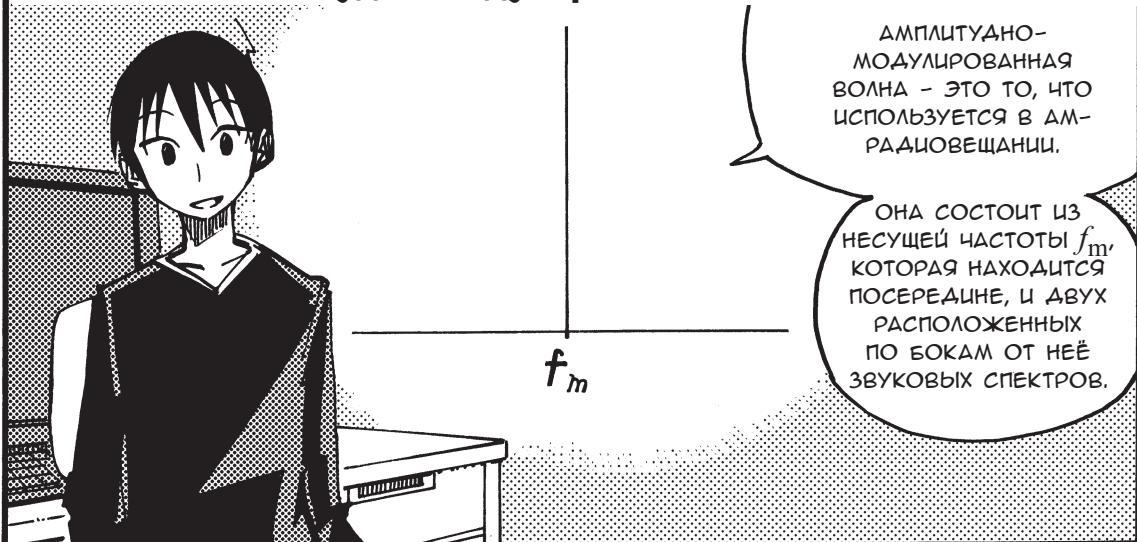


4.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

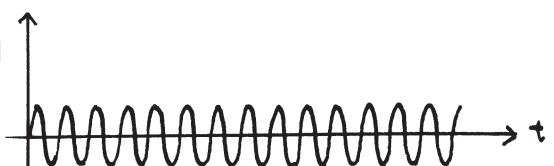
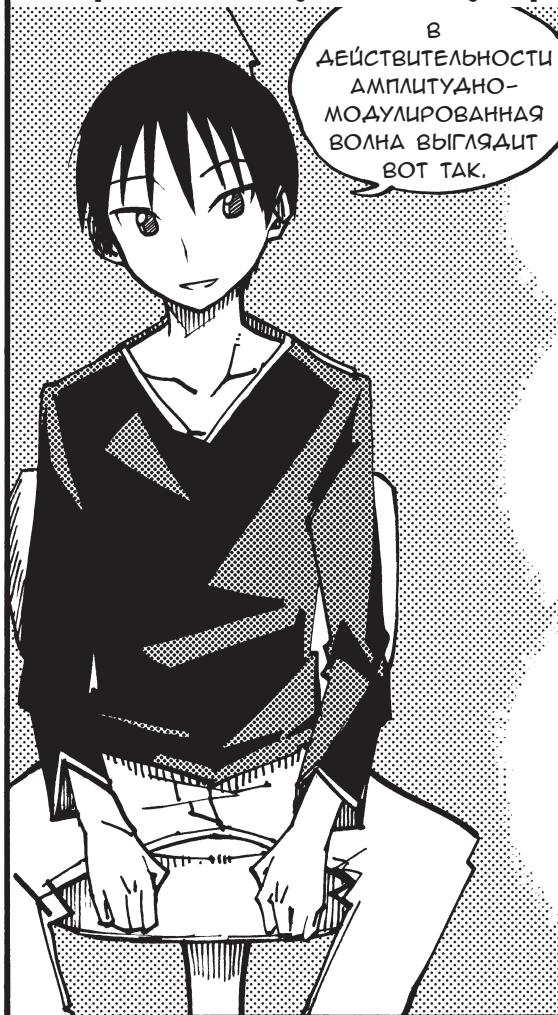
И ЗАТЕМ УСИЛИВАЕМ ЕЁ.
ЭТУ ФУНКЦИЮ ВЫПОЛНЯЕТ
РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ.



<Что такое амплитудно-модулированная волна>



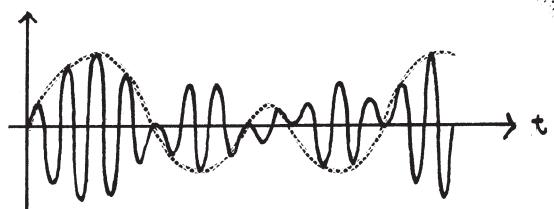
<Форма амплитудно-модулированной волны>



[а] Несущая волна [волна основной частоты амплитудной модуляции]



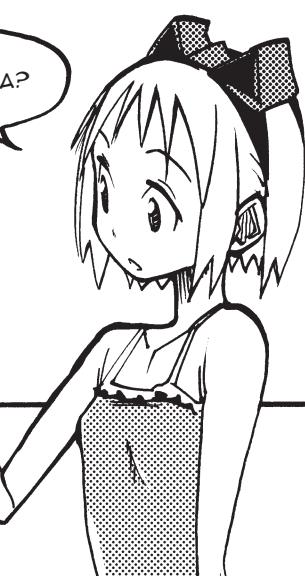
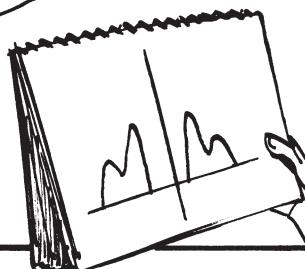
[б] Волна сигнала [волна звукового сигнала, накладываемая на несущую волну]



[в] Амплитудно-модулированная волна
[это форма сигнала самой радиоволны]

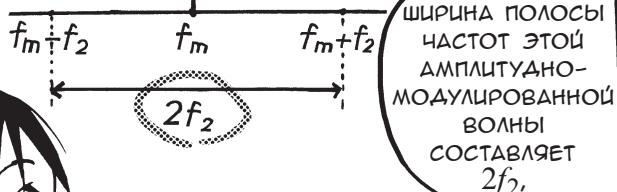
И СПЕКТР РАДИОВОЛНЫ
БУДЕТ ТАКИМ ЖЕ, КАК МЫ
ВИДЕЛИ НА РИС. 4-1.

ДА-А?



НА РИС. [В] ПОКАЗАН РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ f_m СОРАЗМЕРНО С ИЗМЕНЕНИЕМ АМПЛИТУДЫ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА.

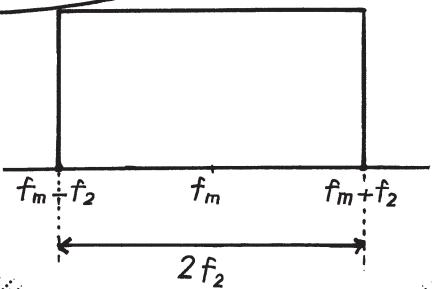
ПОЭТОМУ ОНА СТАЛА ПОХОЖА НА ВОЛНУ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА, ДА?

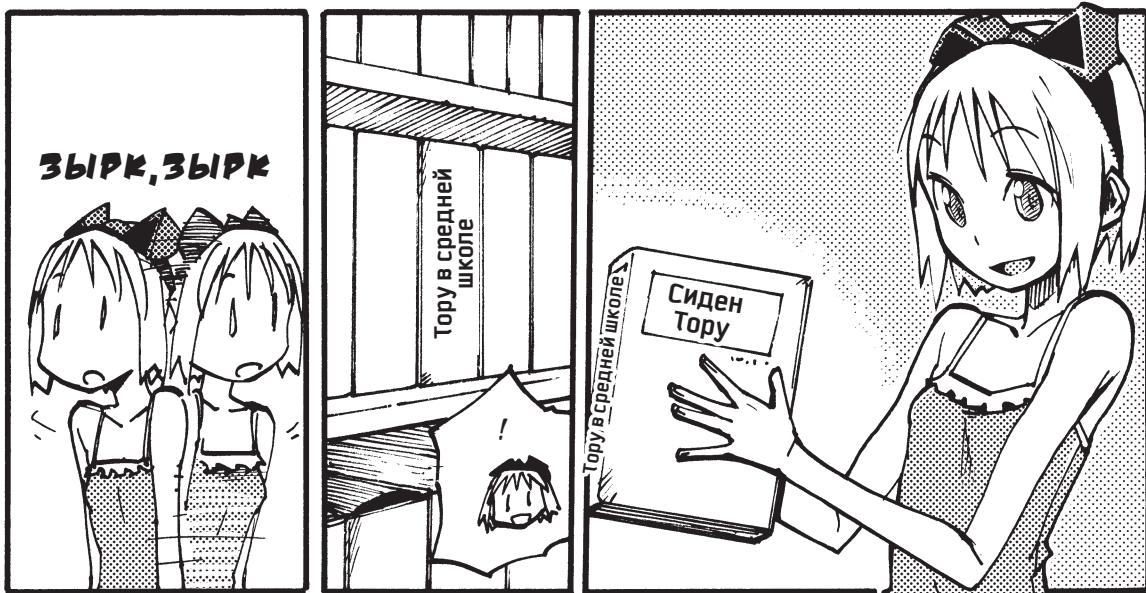


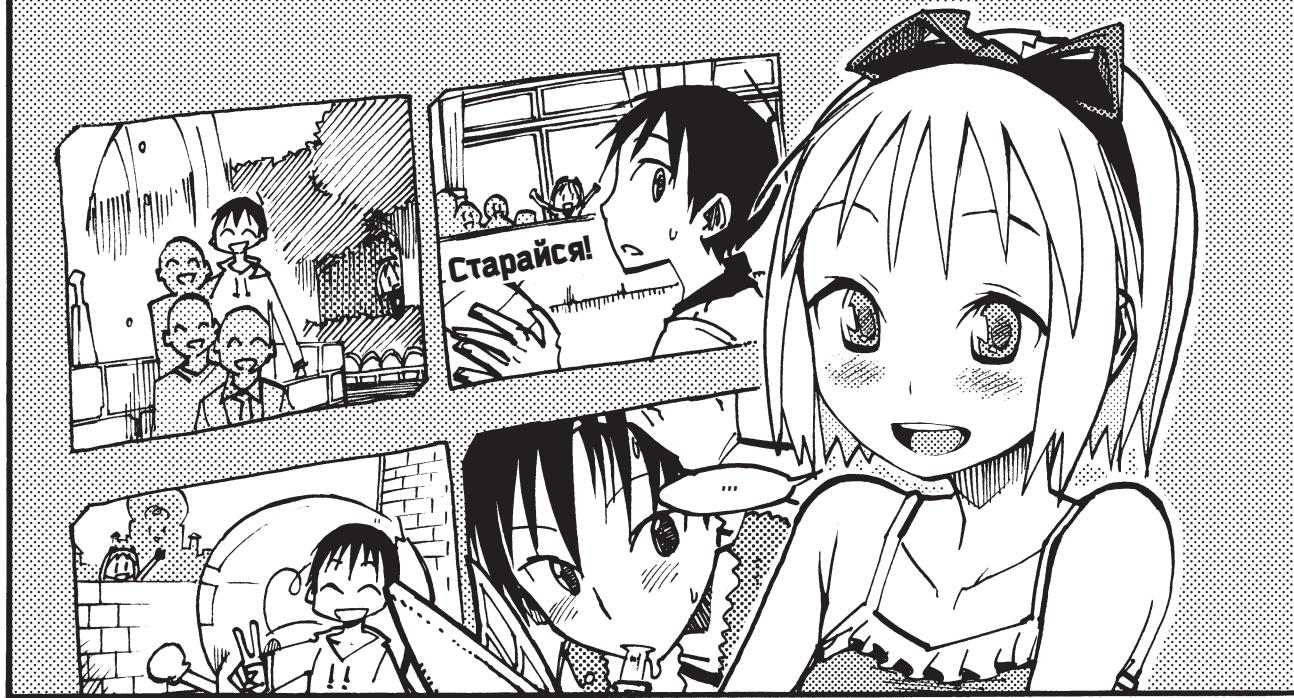
...И БЕЗ СХЕМЫ, КОТОРАЯ УСИЛИВАЕТ ТОЛЬКО ПОКАЗАННЫЙ НА РИС. 4-1 СПЕКТР, МЫ НЕ СМОЖЕМ ИСПОЛЬЗОВАТЬ РАДИОВОЛНУ ЖЕЛАЕМОЙ РАДИОСТАНЦИИ.

ПРАВДА?...

ПОЭТОМУ В ИДЕАЛЕ РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДОЛЖЕН ИМЕТЬ ВОТ ТАКУЮ ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ.







4.2. ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



А... ЧТО ЭТО
ТАКОЕ?

ПОХОЖЕ НА СХЕМУ ПОДКЛЮЧЕНИЯ
С ОБЩИМ ЭМИТЕРОМ...
ЭТО И ЕСТЬ РЕЗОНАНСНЫЙ
УСИЛИТЕЛЬ?

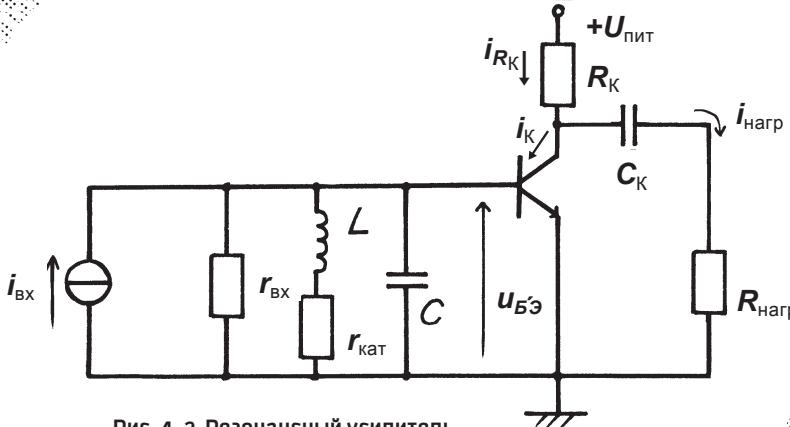


Рис. 4-2 Резонансный усилитель

ТОЧНО!

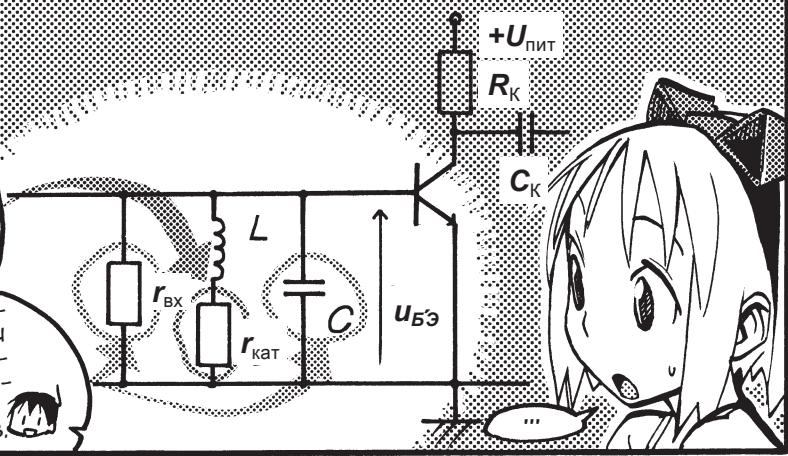
В ОТЛИЧИЕ

ОТ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ С ОБЩИМ
ЭМИТЕРОМ, ВХОДНАЯ ЦЕПЬ ДАННОЙ
СХЕМЫ СОДЕРЖИТ СОПРОТИВЛЕНИЕ
 $r_{\text{вх}}$, КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ L И
КОНДЕНСАТОР C .



КРОМЕ ТОГО,
СОПРОТИВЛЕНИЕ $r_{\text{кат}}$
ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ЭК-
ВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВ-
ЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В КАТУШКЕ
ИНАУКТИВНОСТИ L .

ЗАМЕТИМ, ЧТО ВХОДНОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ $r_{\text{вх}}$, КОНАЕН-
САТОР C , ИНДУКТИВНОСТЬ L И
СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В Ка-
ТУШКЕ $r_{\text{кат}}$ ОБРАЗУЮТ ПОСЛЕ-
ДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ
ЦЕПЬ, ЧТО УСЛОЖНЯЕТ АНАЛИЗ.



ПОЭТОМУ МЫ БЕРЁМ
«ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ
ИМПЕДАНС, СОСТОЯЩИЙ
ИЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ $r_{\text{кат}}$
И ИНАУКТИВНОСТИ L »

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



А ЗАЧЕМ МЫ
ЭТО ДЕЛАЕМ?

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



ТАКИМ ОБРАЗОМ, СХЕМУ НА РИС. 4-2 МЫ МОЖЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЬ В СХЕМУ НА РИС. 4-3.

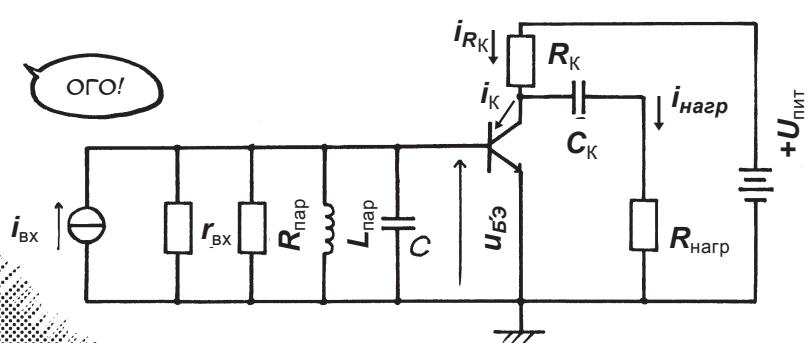


Рис. 4-3 Эквивалентная схема для резонансного усилителя

<Закорачивание элементов>

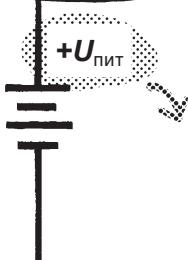


ИЗ РИС. 4-3 МЫ ПОЛУЧИМ «ЭКВИВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА».

ДА.



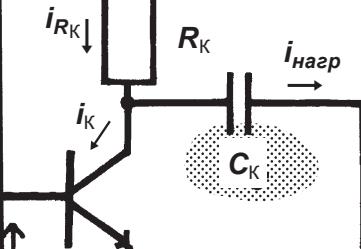
ВО-ПЕРВЫХ, ТАК КАК ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СОДЕРЖИТ ТОЛЬКО ПЕРЕМЕННЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ, ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА $U_{\text{пит}}$ МОЖНО «ЗАКОРОТИТЬ».



ЗАКОРОТИТЬ...



КРОМЕ ТОГО, МЫ СЧИТАЕМ, ЧТО КОНДЕНСАТОР C_K ОБЛАДАЕТ МАЛЫМ ИМПЕДАНСОМ ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ПОЭТОМУ ЕГО ТОЖЕ МОЖНО «ЗАКОРОТИТЬ».



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

ПОНЯТО!
ЗАКОРОЧЕННЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ ИСЧЕЗЛИ!

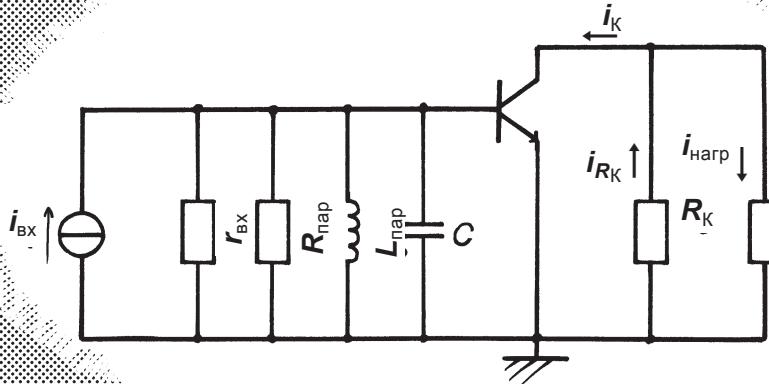


Рис. 4-4 Преобразование к эквивалентной схеме
резонансного усилителя

<Эквивалентная схема для высоких частот>

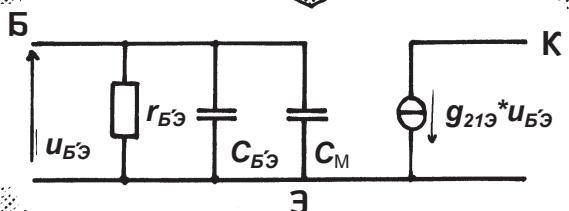
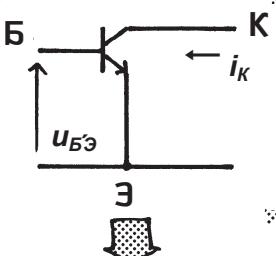
ДАЛЕЕ, И ЭТУ СХЕМУ
МЫ ПРЕОБРАЗУЕМ В
«ЭКВИВАЛЕНТНУЮ
СХЕМУ ДЛЯ ВЫСОКИХ
ЧАСТОТ».

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.

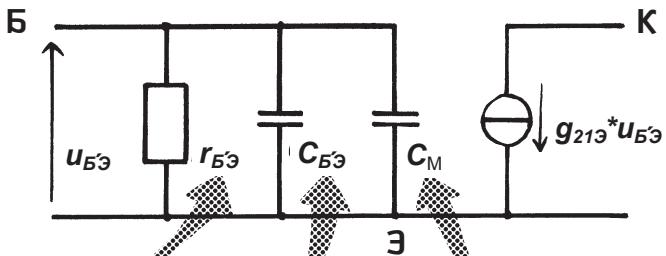


* «Б'» здесь означает точку в середине самой базы транзистора, в то время «б» без чёрточки означает вывод базы. – Прим. перев.

Рис. 4-5 Эквивалентная схема
транзистора для высоких частот

«Паразитная ёмкость и эффект Миллера»

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



r_{BE} – сопротивление эмиттерного перехода;

C_{BE} – 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.

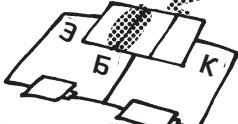


ТАК...

А ЧТО ТАКОЕ «ПАРАЗИТНАЯ ЁМКОСТЬ»?

НО ТОГДА МОЖНО ВЕДЬ ОБОЙТИСЬ ТОЛЬКО C_{BE} ...

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

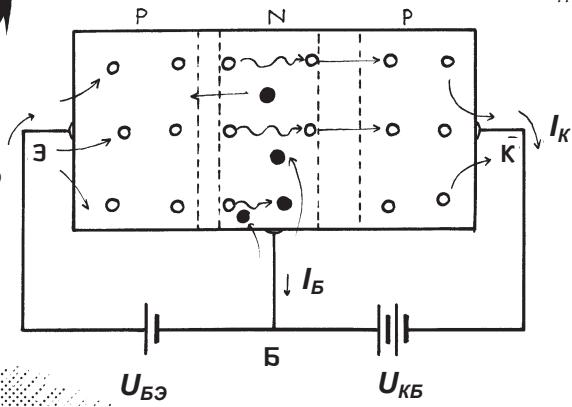


КСТАТИ, НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ... ЧЕМ ВЫШЕ ЧАСТОТА СИГНАЛА, ТЕМ БОЛЬШЕ СТАНОВИТСЯ ЭТА ЁМКОСТЬ.



ЗАЧЕМ ЗДЕСЬ ЕЩЁ КАКОЙ-ТО «ЭФФЕКТ МИЛЛЕРА»?





ДАВАЙ ВСПОМНИМ УСТРОЙСТВО
р-н-р-транзистора.

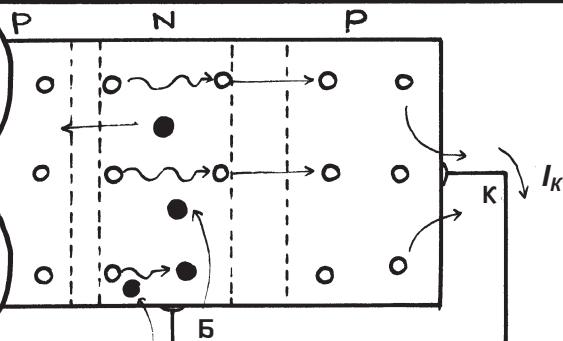
ЧЁРНЫЕ КРУЖКИ – ЭТО СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ,



...А БЕЛЫЕ КРУЖКИ –
ЭТО ДЫРКИ, ДА?!

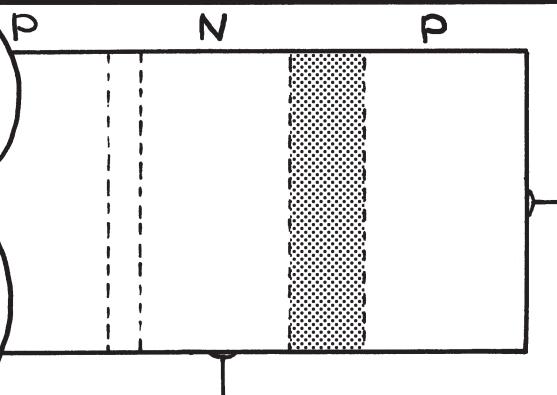
В ЭТОМ СЛУЧАЕ К
КОЛЛЕКТОРНОМУ ПЕРЕХОДУ
ПРИЛОЖЕНО НАПРЯЖЕНИЕ
ОБРАТНОГО СМЕШЕНИЯ...

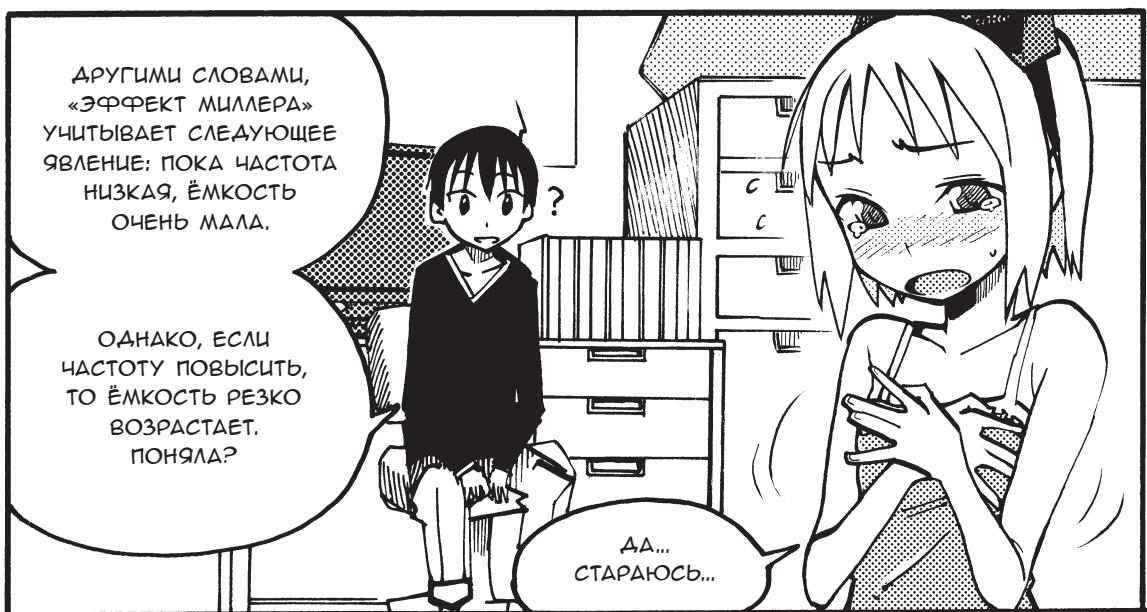
...ПОЭТОМУ В ЗОНЕ
КОЛЛЕКТОРНОГО
ПЕРЕХОДА НОСИТЕЛИ
ЗАРЯДА РАЗНЫХ ТИПОВ
(СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ)
РЕКОМБИНИРУЮТ МЕЖДУ СОБОЙ.



В РЕЗУЛЬТАТЕ
ФОРМИРУЕТСЯ
СЛОЙ, В КОТОРОМ
НЕТ НОСИТЕЛЕЙ.

ОН НАЗЫВАЕТСЯ
«ОБЕДНЁННЫМ
СЛОЕМ».



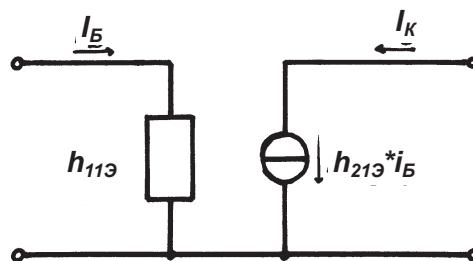


<Упрощение эквивалентной схемы для высоких частот>



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

...ИСТОЧНИК ТОКА
ВЫХОДНОЙ ЦЕПИ
ОПИСЫВАЕТСЯ
ВЫРАЖЕНИЕМ $h_{21\beta} * i_B$.

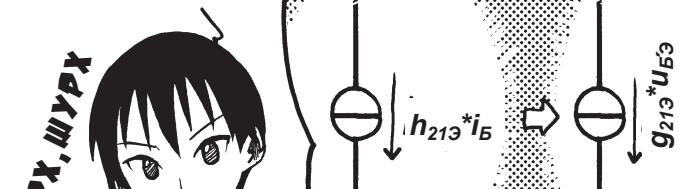


ДА... ДА!

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

А НАПРЯЖЕНИЕ $u_{B\beta}$
НА ЭМИТЕРНОМ
ПЕРЕХОДЕ.

ТО ЕСТЬ В КАЧЕСТВЕ
ИСТОЧНИКА ТОКА ВМЕСТО
 $h_{21\beta} * i_B$ МЫ ИСПОЛЬЗУЕМ
 $g_{21\beta} * u_{B\beta}$, ГДЕ $g_{21\beta}$ - ЭТО
ПРОВОДИМОСТЬ ПРЯМОЙ
ПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМЕ
 g -ПАРАМЕТРОВ.



ПОЭТОМУ ПРЕОБРАЗУЕМ ЭКВИВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ РИС. 4-4, ИСПОЛЬЗУЯ РИС. 4-5.

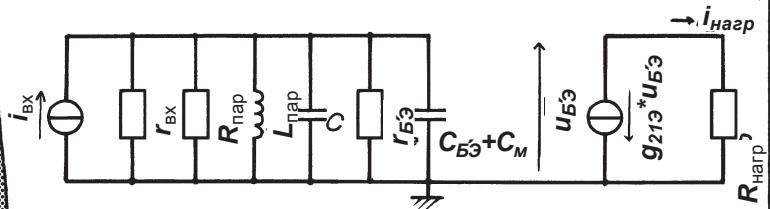


Рис. 4-6 Эквивалентная схема резонансного усилителя для высоких частот

ВОТ ЧТО У НАС ПОЛУЧИЛОСЬ!

НО ПОЧЕМУ
 R_K ИСЧЕЗЛО?

ДЕЛО В ТОМ, ЧТО ЕСТЬ СЧИТАТЬ R_K ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ, НАМНОГО БОЛЬШЕ, ЧЕМ ДАЖЕ $R_{нагр}$. ТО ЭТО БУДЕТ ОЗНАЧАТЬ ПОЧТИ ПОЛНОЕ ОТСУТСТВИЕ ТОКА, ТЕКУЩЕГО ЧЕРЕЗ R_K . ПОТОМУ-ТО ИМ МОЖНО ПРЕНЕБРЕЧЬ.

$\rightarrow i_{нагр}$

R_K

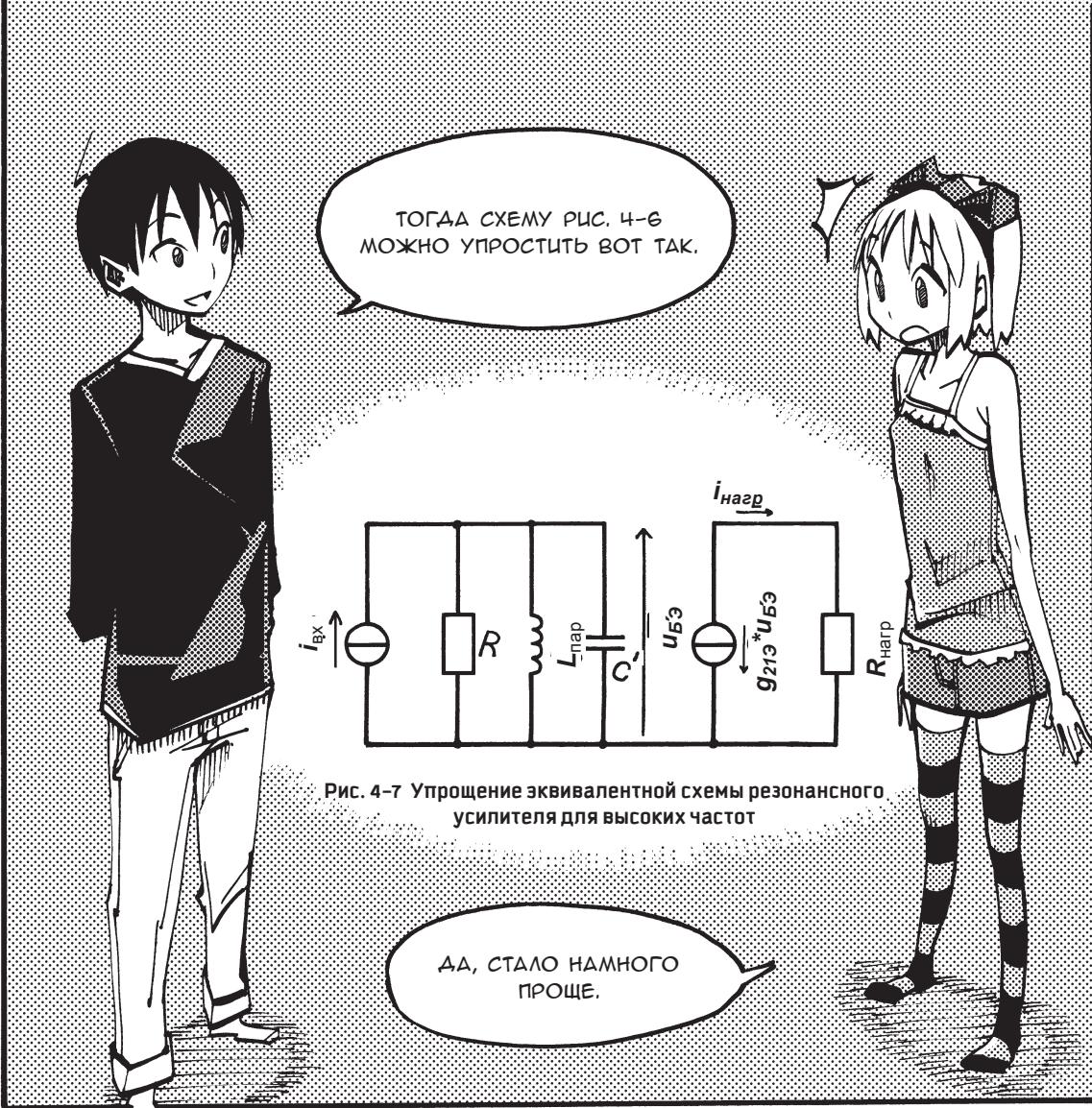
ТЕПЕРЬ МЫ ОБЪЕДИНЯМ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЁННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ...

$$C' = C + C_{B'E} + C_M$$

...А ТАКЖЕ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЁННЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

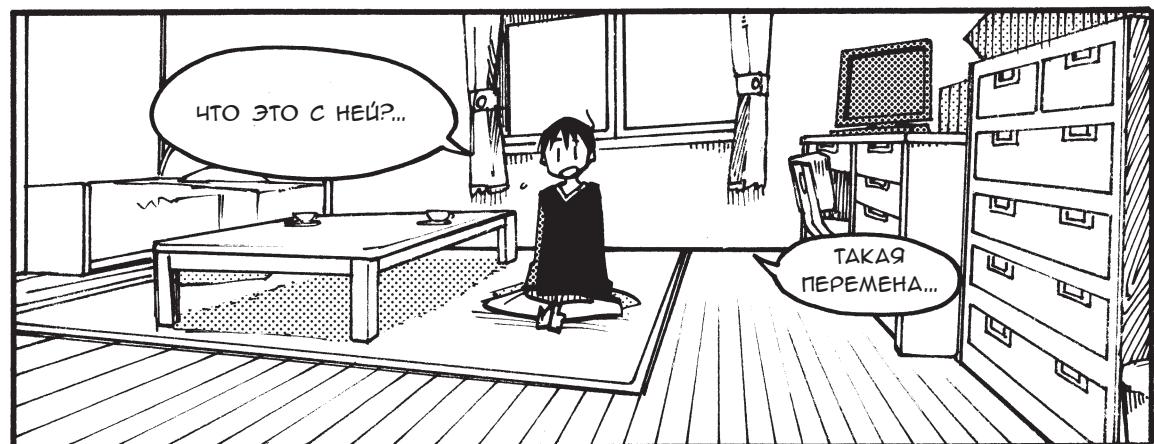
$$R = r_{вх} \parallel R_{пар} \parallel r_{B'E}$$

* Здесь и далее запись вида $r_{вх} \parallel R_{пар} \parallel r_{B'E}$ означает общее сопротивление параллельной цепи, то есть $r_{вх} \parallel R_{пар} \parallel r_{B'E} = (r_{вх} * R_{пар} * r_{B'E}) / (r_{вх} * R_{пар} + R_{пар} * r_{B'E} + r_{B'E} * r_{вх})$. – Прим. перев.

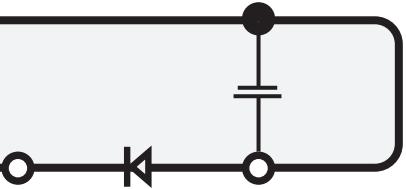








ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ



▷ 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.

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

$$i_{\text{нагр}} = -g_{21\Theta} u_{\text{БЭ}} \quad (*)$$

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



ПОДСТАВЛЯЯ ВЫРАЖЕНИЯ ТОКОВ, ПОЛУЧИМ СЛЕДУЮЩЕЕ...

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

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.

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

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.

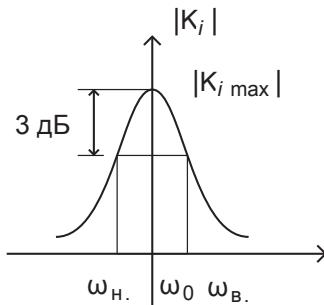


Рис. 4-А1 Частотная характеристика коэффициента передачи тока для резонансного усилителя

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 ω_H И ω_B — ЭТО ТАКИЕ ЧАСТОТЫ, НА КОТОРЫХ K_i СНИЖАЕТСЯ НА 3 ДБ ПО СРАВНЕНИЮ С $K_{i \max}$, РАССЧИТАВШИ ОНИ ВОТ ТАК:

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

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

Далее, ширина полосы частот будет равна $\omega_B - \omega_H$. 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, которые, как считается, нельзя пренебречь 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.

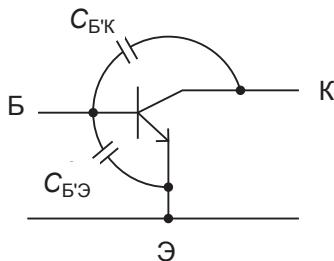
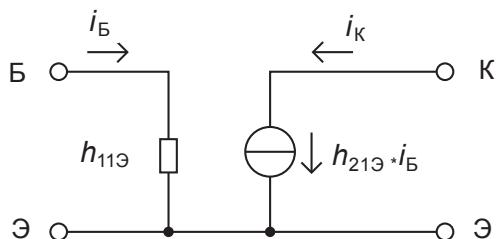
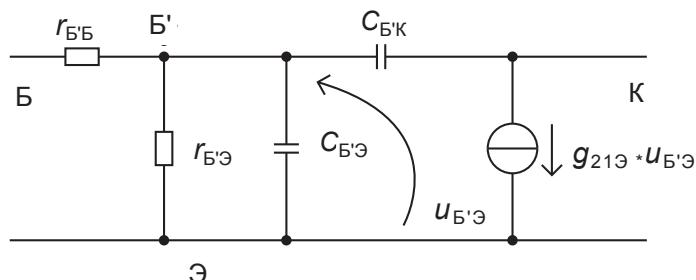


Рис. 4-А2 Представление паразитных ёмкостей, возникающих в транзисторе

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 $r_{B'B}$ – это сопротивление базы, составляющее всего около 10 Ом. Сопротивление $r_{B'E}$ – это сопротивление участка «база-эмиттер», имеющее тот же смысл, что и параметр h_{11E} . Кроме того, для упрощения дальнейших рассуждений источник тока $h_{21E} \cdot i_B$, управляемый током i_B , мы заменили на источник тока $g_{21} \cdot u_{B'E}$, управляемый напряжением $u_{B'E}$.

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.

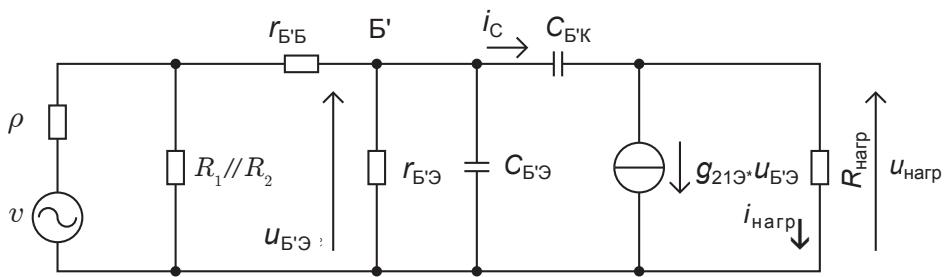


Рис. 4-А4 Эквивалентная схема усилителя с общим эмиттером для переменного тока, в которой транзистор заменён электрической моделью с рис. 4-А3

Далее мы проведём преобразование к схеме с параллельным соединением конденсаторов $C_{B'K}$ и $C_{B'E}$. 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_{11E} и выход $h_{21E} \cdot i_B$ отделены друг от друга, что упрощает рассуждения, как вы сами увидите в главе 6. Поэтому здесь лучше отделить левую часть схемы, включающую $C_{B'K}$, от контура, содержащего $g_{21} \cdot u_{B'E}$ и $R_{нагр}$. Итак, займёмся расчётом элементов схемы рис. 4-А5.

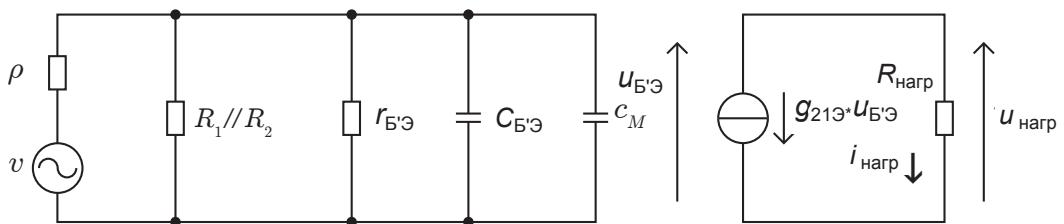


Рис. 4-А5 Эквивалентная схема усилителя с общим эмиттером для переменного тока (преобразование схемы рис. 4-А4)

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

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

$$i_C = j\omega C_{B'K} (u_{B'E} - u_{нагр})$$

- 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 ($g_{21E} * u_{B'E}$) и напряжением $u_{B'E}$ на входе, то есть

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

Если при этом считать, что

$$R_{нагр} \gg \frac{1}{j\omega C_{B'K}}, g_{21E} \gg j\omega C_{B'K},$$

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:

$$u_{нагр} \approx -g_{21E} * R_{нагр} u_{B'E}$$

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

$$i_C = j\omega C_{B'K} (u_{B'E} - u_{нагр}) = j\omega C_{B'K} (1 + g_{21E} * R_{нагр}) u_{B'E}$$

Наконец, приведём паразитную $C_{B'K}$ 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 .

$$Z_{B'E} = \frac{1}{j\omega C_M} = \frac{u_{B'E}}{i_C} = \frac{1}{j\omega C_{B'K} (1 + g_{21E} * R_{нагр})}$$

Следовательно,

$$C_M = 1 + g_{21E} * R_{нагр}$$

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

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

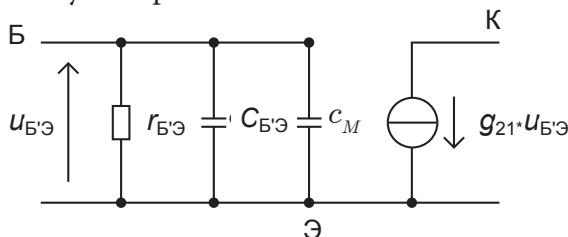


Рис. 4-А6 Преобразование эквивалентной схемы транзистора для высоких частот (получилась такая же схема, как на рис. 4-7)

Пересчёт импедансов

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

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

Адmittанс Y_2 цепи на рисунке справа на той же странице:

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

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

из равенства действительных частей следует, что

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

а из равенства мнимых частей:

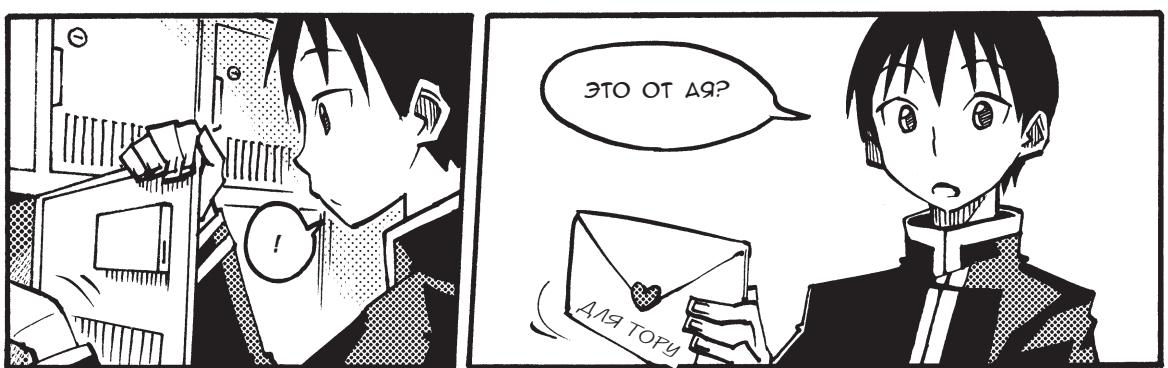
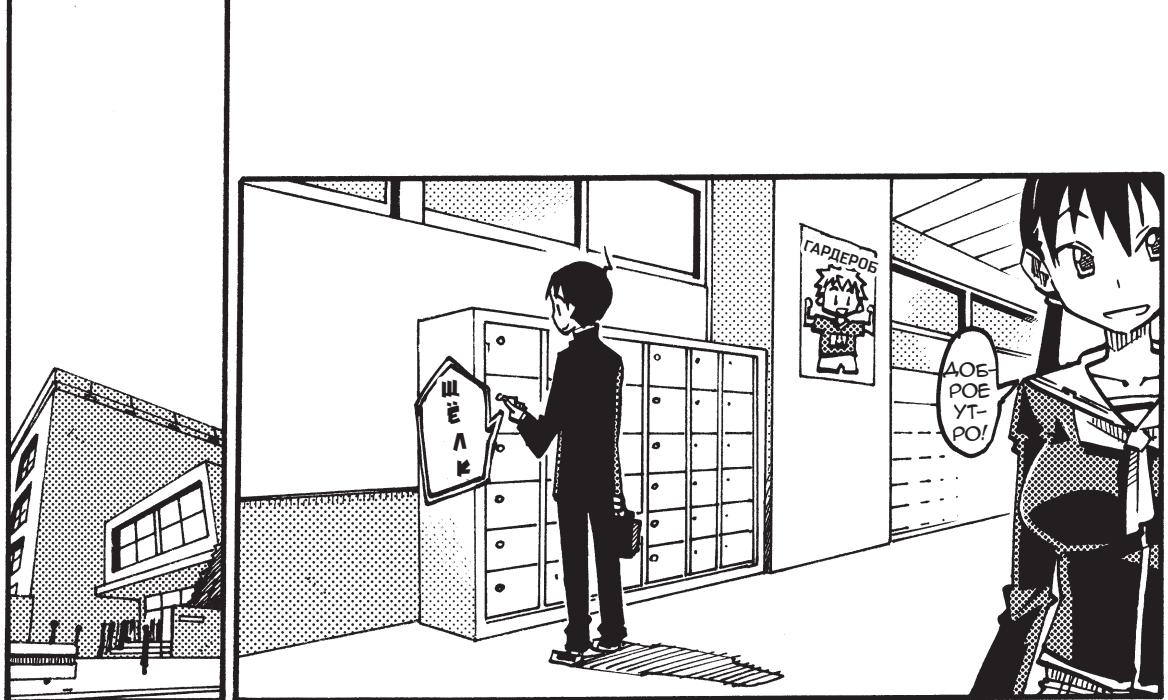
$$L_{\text{пар}} = \frac{r_{\text{кат}}^2 + \omega^2 L^2}{\omega^2 L}$$

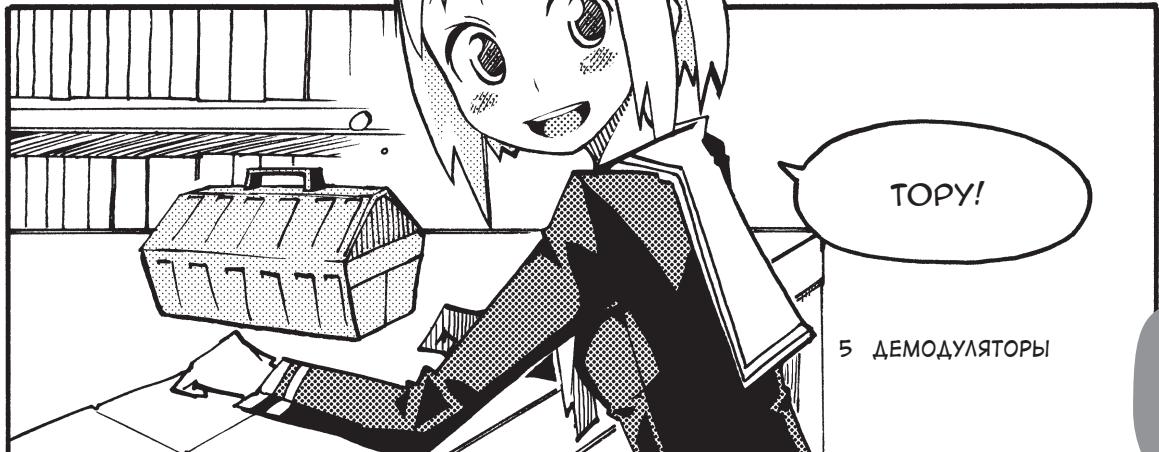
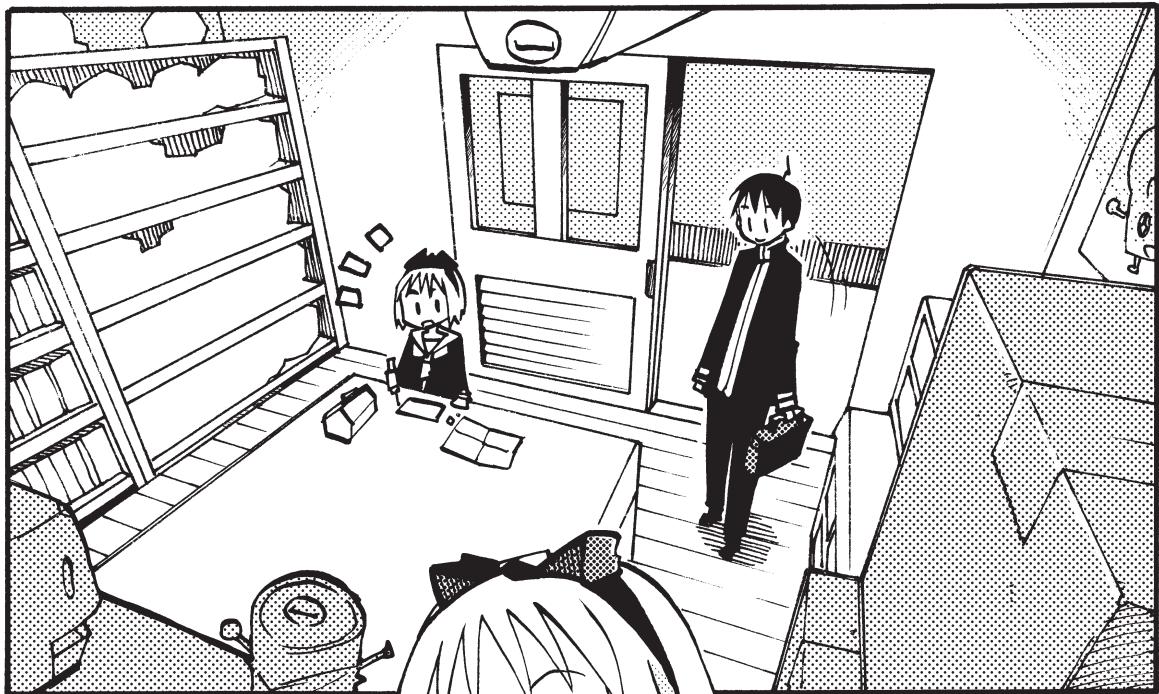
Полученные формулы помогут преобразовать последовательные цепи в параллельные.

5
ГЛАВА

ДЕМОДУЛЯТОРЫ







5.1. ДЕМОДУЛЯЦИЯ И ЛИНЕЙНЫЙ ДЕТЕКТОР



<Демодуляция>

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗВУКОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИЗ УСИЛЕННОЙ МОДУЛИРОВАННОЙ ВОЛНЫ НАЗЫВАЕТСЯ «ДЕМОДУЛЯЦИЕЙ».

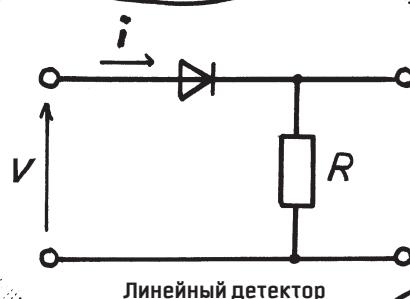
ЛЮБОВЬ!

БЕЗ ДЕМОДУЛЯЦИИ МЫ НЕ СМОЖЕМ УСЛЫШАТЬ ЗВУК.

А КАК ДЕЛАТЬ «ДЕМОДУЛЯЦИЮ»?

<Линейный детектор>

ЧТОБЫ ДЕМОДУЛИРОВАТЬ ВОЛНУ АМ, ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ЛИНЕЙНЫЙ ДЕТЕКТОР.



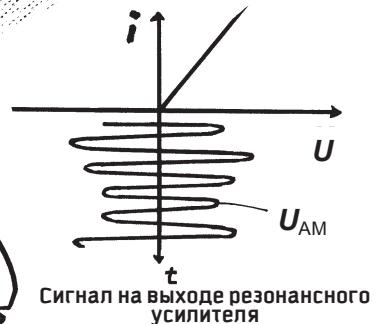
СЛЕВА - ВХОД,
А СПРАВА - ВЫХОД?!

<Принцип линейного детектирования>

ОБЪЯСНЮ
ПРИНЦИП
ЛИНЕЙНОГО
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ.



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

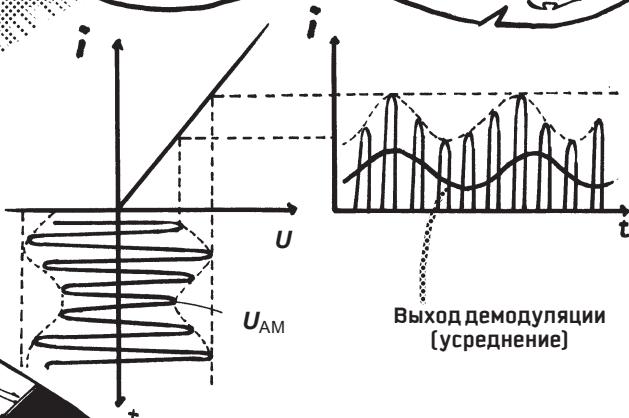


А ЭТО - ВОЛНА НА
ВЫХОДЕ ЛИНЕЙНОГО
ДЕТЕКТОРА.



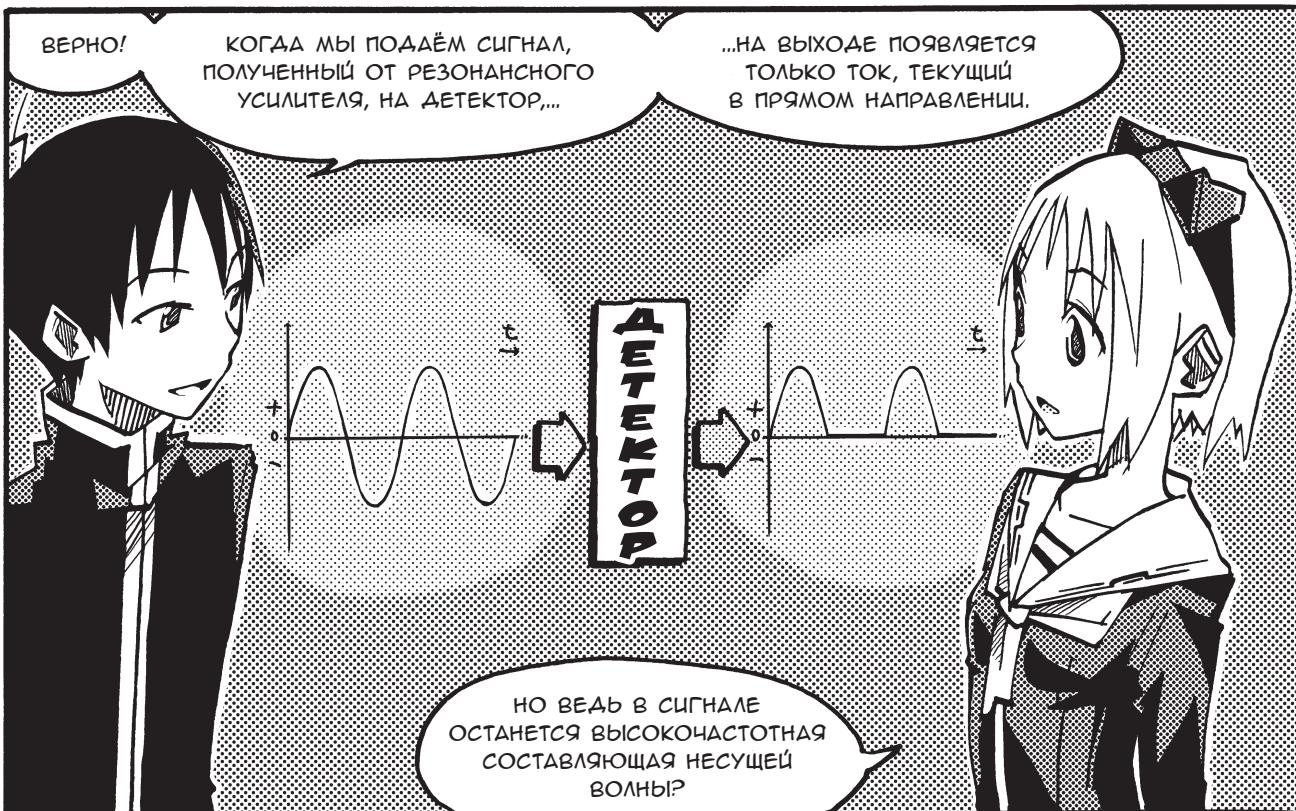
ЕСЛИ ЗАТЕМ
УСРЕДНИТЬ ЭТУ ВОЛНУ,
ТО ПОЛУЧИТСЯ ФОРМА
СИГНАЛА, ПОКАЗАННАЯ
ЖИРНОЙ ЛИНИЕЙ.
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
«ВЫХОДОМ
ДЕМОДУЛЯЦИИ».

ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
«ВЫХОДА
ДЕМОДУЛЯЦИИ»
ИСПОЛЬЗУЮТ
«ФИЛЬТРЫ».



ДА, ТЫ
РАНЬШЕ
ГОВОРИЛ
ПРО
ФИЛЬТРЫ...

ДА!
ПРО
ФИЛЬТРЫ Я
ОБЪЯСНЮ
ПОТОМ, А
СПЕРВА...



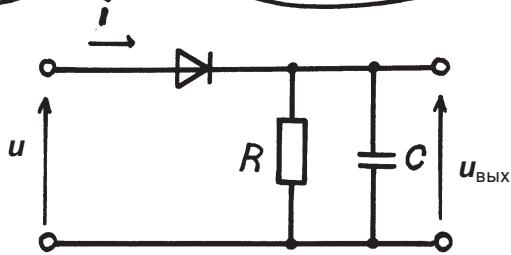
5.2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ

ТЕПЕРЬ Я РАССКАЖУ ПРО «ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ».

А...
ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

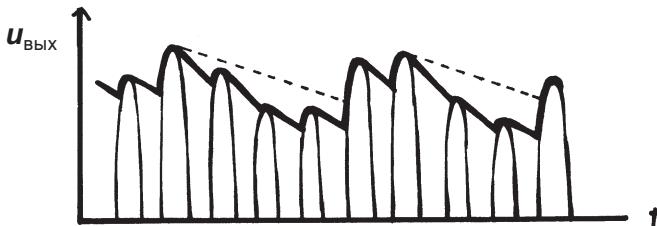
МЫ ПОДКЛЮЧИМ КОНДЕНСАТОР К ВЫХОДУ ЛИНЕЙНОГО ДЕТЕКТОРА, ПАРАЛЛЕЛЬНО РЕЗИСТОРУ.

ЭТО ПОЗВОЛIT ПОЛУЧИТЬ СИГНАЛ, НАПОМИНАЮЩИЙ ЗВУКОВУЮ ВОЛНУ.



ДАЛЕЕ, ПРОПУСТИВ ПОЛУЧЕННОЕ ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЧЕРЕЗ ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ,...

...МЫ ПОЛУЧИМ ФОРМУ ВОЛНЫ, БЛИЗКУЮ К ЗВУКОВОМУ СИГНАЛУ.



Форма волны на выходе детектора огибающей

5.3. ФИЛЬТРЫ

ТЕПЕРЬ ПОГОВОРИМ
О ФИЛЬТРАХ.

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

ПОНЯТНО.

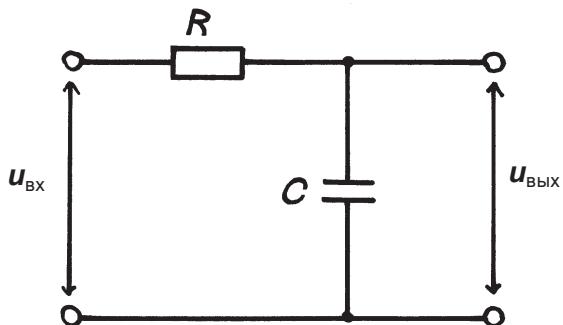
СУЩЕСТВУЕТ 2 ВИДА
ФИЛЬТРОВ:
«ФИЛЬТРЫ ВЕРХНИХ ЧАСТОТ»
и «ФИЛЬТРЫ НИЖНИХ
ЧАСТОТ».

НАЧНЁМ С ФИЛЬТРОВ
НИЖНИХ ЧАСТОТ.

ДАВАЙ.

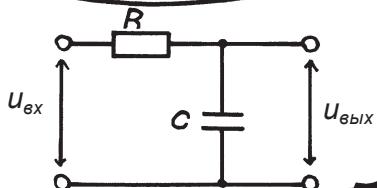
«ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ»

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.

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

ЭТО ПОЗВОЛЯЕТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДАННЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ПРОПУСКАНИЯ ЧАСТОТ НИЖЕ

$$f = \frac{1}{2\pi f CR}.$$

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

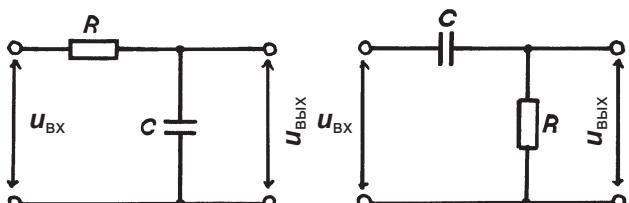
<Фильтр верхних частот>

А ЧТО ТАКОЕ ТОГДА ФИЛЬТР ВЕРХНИХ ЧАСТОТ...?

ОНИ ПРОПУСКАЮТ ЧАСТОТЫ ВЫШЕ

$$f = \frac{1}{2\pi f CR}.$$

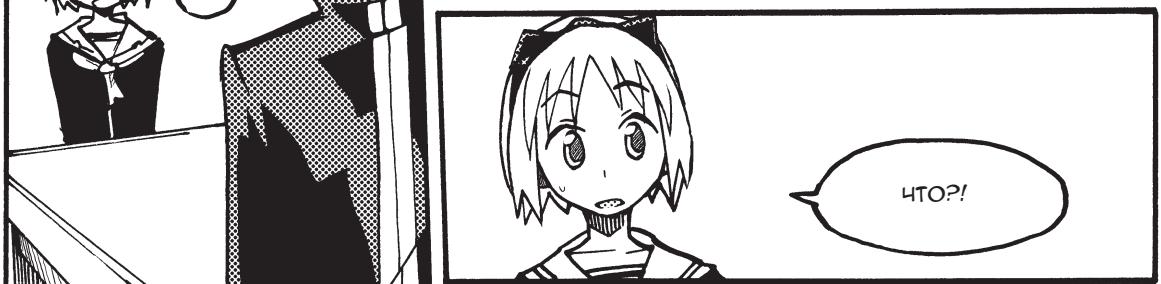
ЕСЛИ В ФИЛЬТРЕ НИЖНИХ ЧАСТОТ ПОМЕНЯТЬ МЕСТАМИ R И C , ТО ПОЛУЧИТСЯ ФИЛЬТР ВЕРХНИХ ЧАСТОТ.



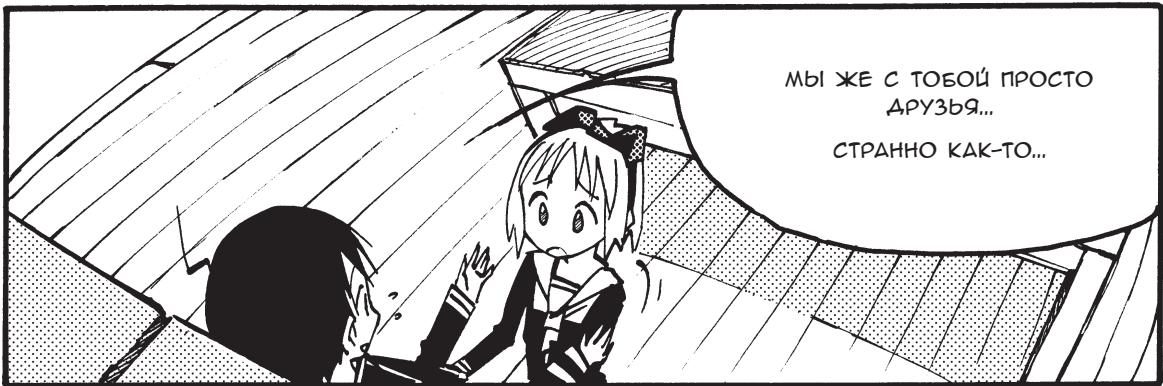
Фильтр нижних частот

Фильтр верхних частот

МОЖЕШЬ СЧИТАТЬ, ЧТО ЭТО ПЕРЕВЁРНУТЫЙ ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ.

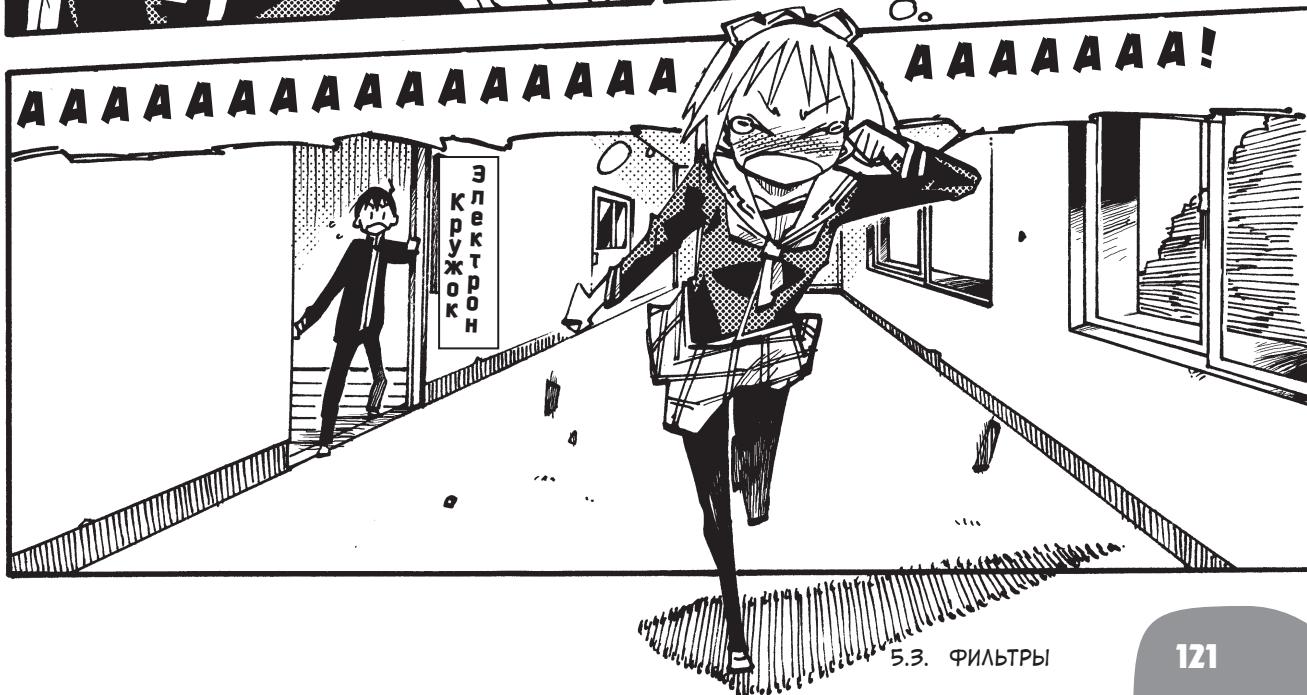






ОН МЕНЯ РАЗЛЮБИЛ!!



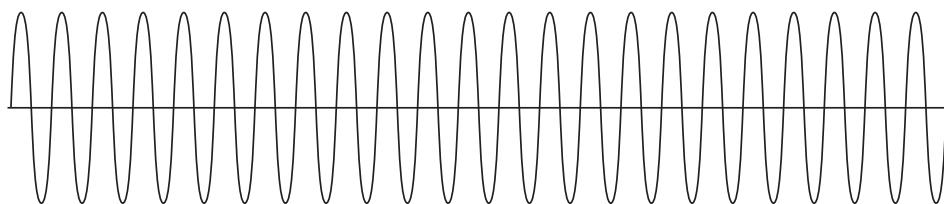


ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

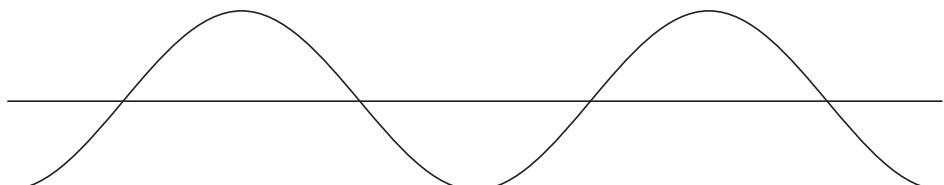
▢ О частотной модуляции (ЧМ)

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

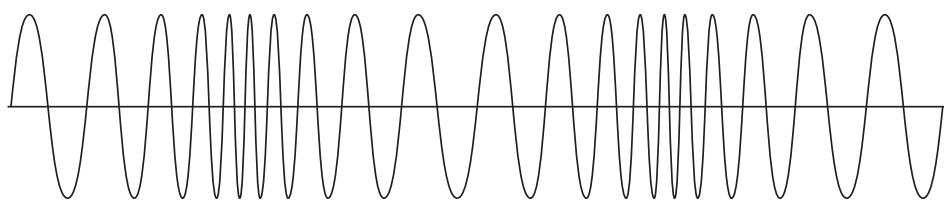
При частотной модуляции, например, в FM-радиовещании, несущая волна ди-
апазона 76,0–90,0 мГц*, предназначенная для передачи в эфир, изменяет свою ча-
стоту в зависимости от силы сигнала. Другими словами, при частотной модуля-
ции в зависимости от силы сигнала частота волн изменяется относительно несу-
щей частоты (которая зависит от радиостанции; например, «NHK-FM Токио» ис-
пользует частоту 82,5 МГц).



(a) 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.

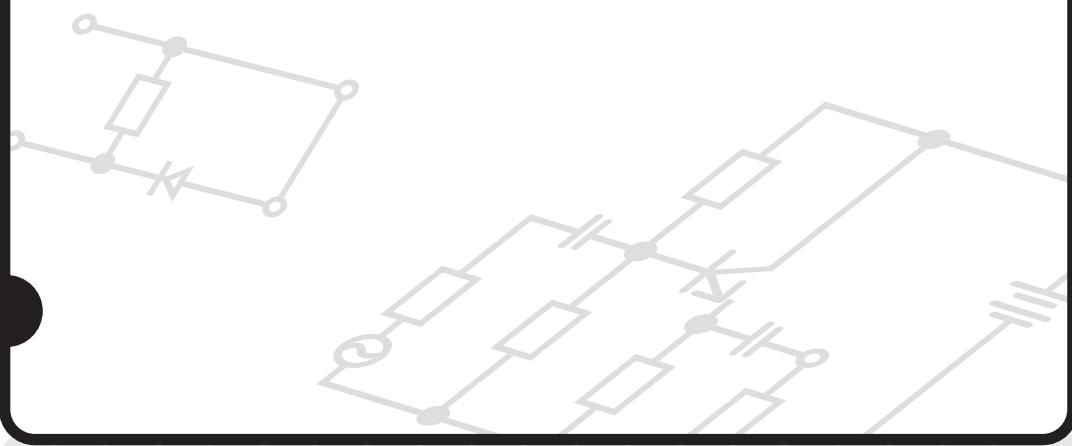
Таким образом, амплитуда частотно-модулированной волны постоянна, а частота ежемоментно изменяется. Даже если к такой волне добавляются помехи, её всё равно можно демодулировать – достаточно измерить частоту волны. Кроме того, в FM-радиовещании можно использовать полосу шириной 100 кГц, не опасаясь межканальной интерференции, что позволяет охватить весь спектр звуковых сигналов. Следовательно, по сравнению с AM-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...

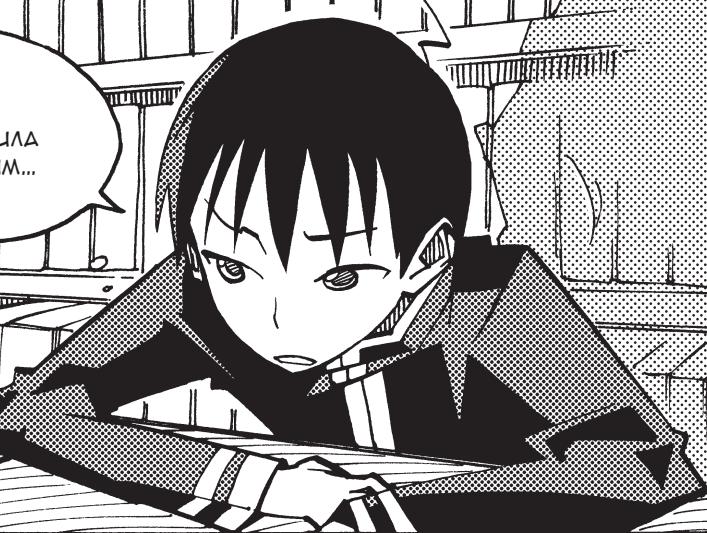


АБОНЕНТ ВЫКЛЮЧЕН
ИЛИ НАХОДИТСЯ ВНЕ
ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ
СЕТИ...

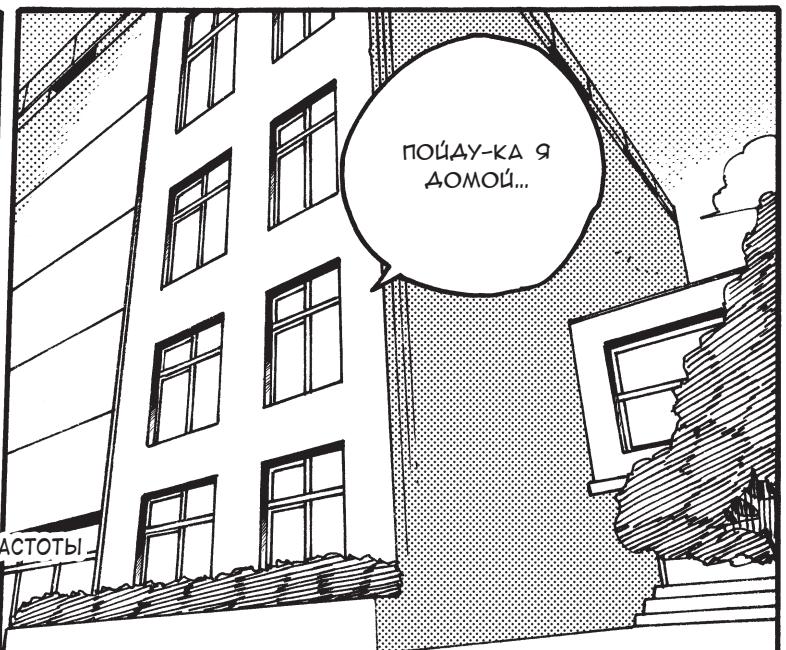


С ТОГО ДНЯ
ОНА ПЕРЕСТАЛА
ПРИХОДИТЬ
В КРУЖОК.

АЯ...
Наверное, решила
порвать с этим...



ПОЙДУ-КА Я
ДОМОЙ...





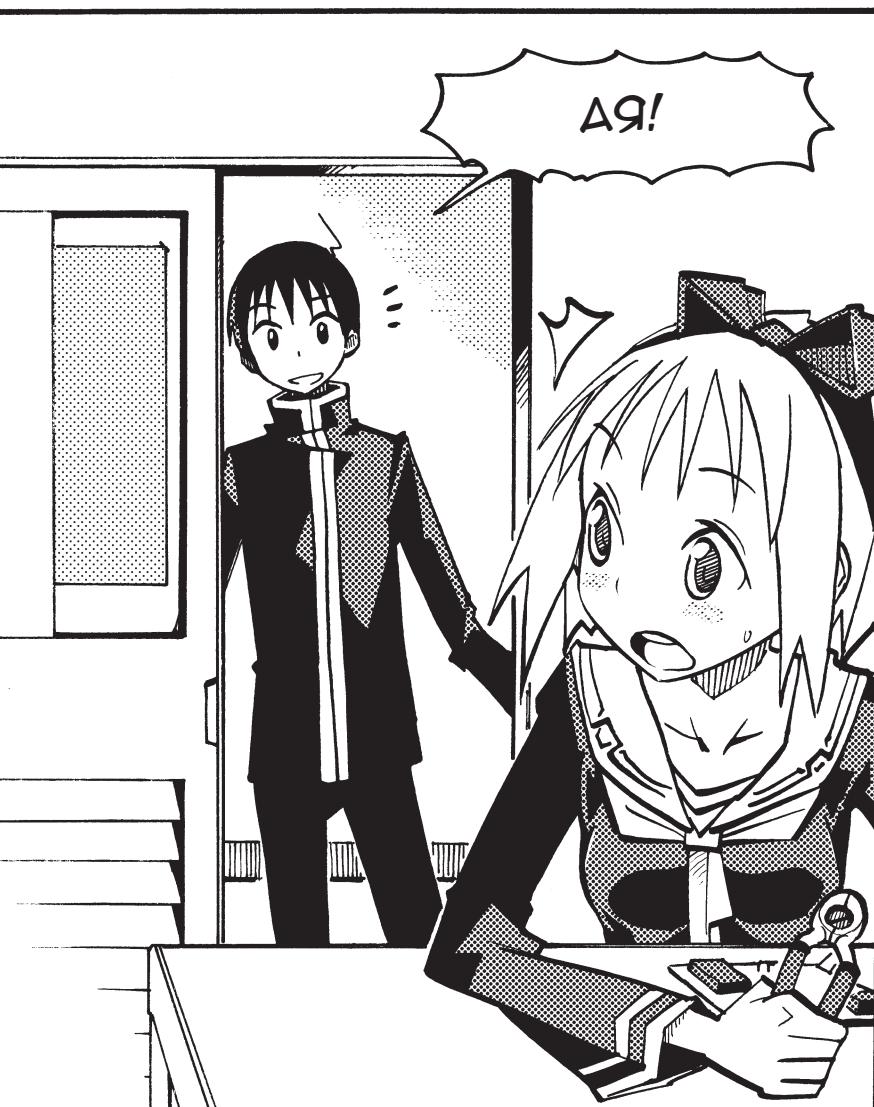
Я ТОЖЕ ВИНОВАТ, ЧТО
РАЗОЗЛИЛСЯ И
НАКРИДАЛ НА НЕЁ...

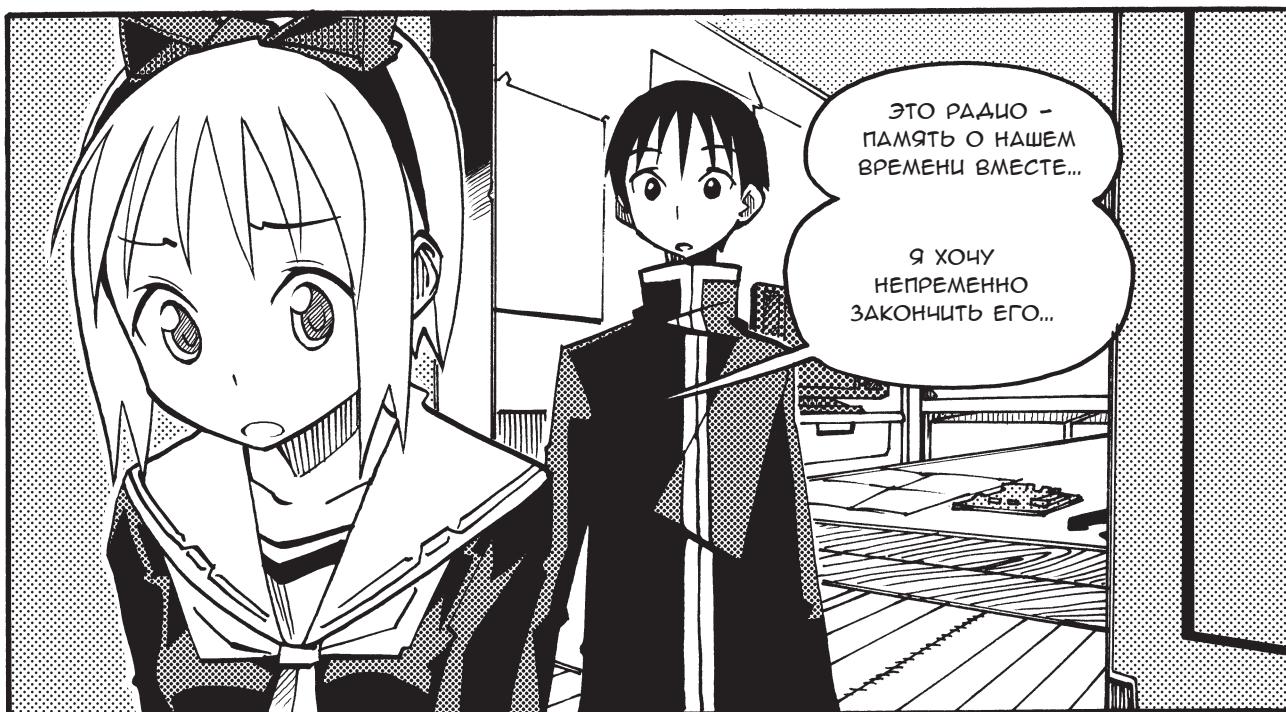
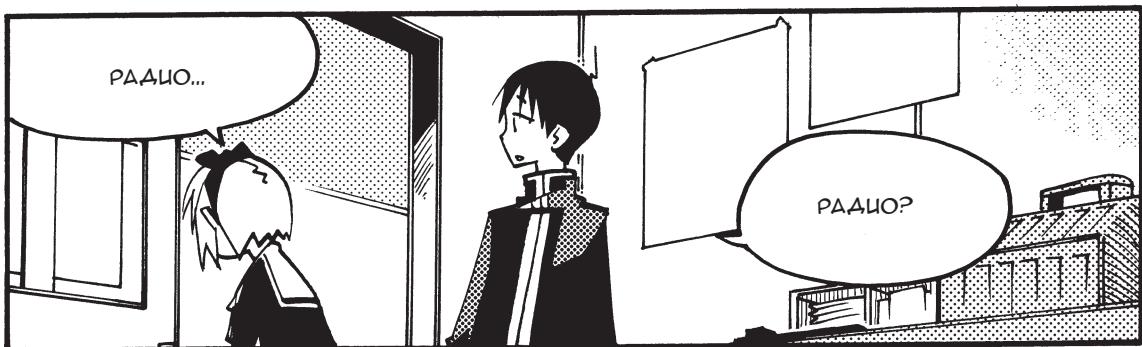
И ЧЕГО ОНА ТАК
РАЗБУШЕВАЛАСЬ...



ОЙ,
ГДЕ
МОБИЛЬ-
НИК...







6.1. ЧТО ТАКОЕ УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



<Три типа усилителей>

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ БЫВАЮТ ТРЕХ ТИПОВ.

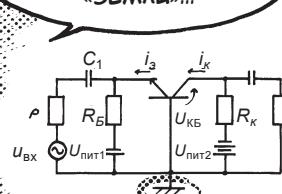
(1.) УСИЛИТЕЛИ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ (ОБ)

(2.) УСИЛИТЕЛИ С ОБЩИМ ЭМИТЕРОМ (ОЭ)

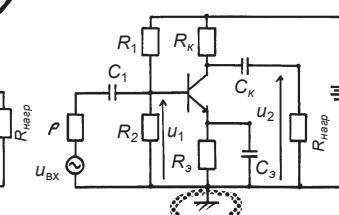
(3.) УСИЛИТЕЛИ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ (ОК)

Мм...
А ЧЕМ ОНИ
ОТЛИЧАЮТСЯ?

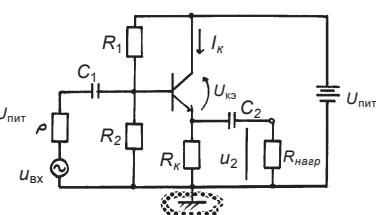
местом
подключения
«ЗЕМЛИ»...



Усилитель с ОБ



Усилитель с ОЭ



Усилитель с ОК

...А ТАКЖЕ
СТЕПЕНЬЮ УСИЛЕНИЯ
СИГНАЛОВ.

СОЕДИНИВ

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

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

ПОНЯТНО!

6.2. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

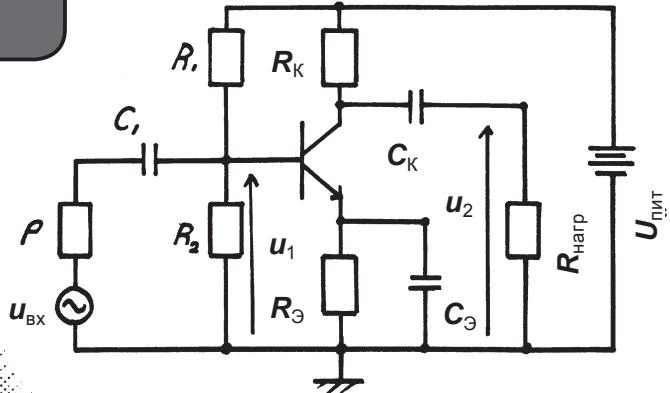
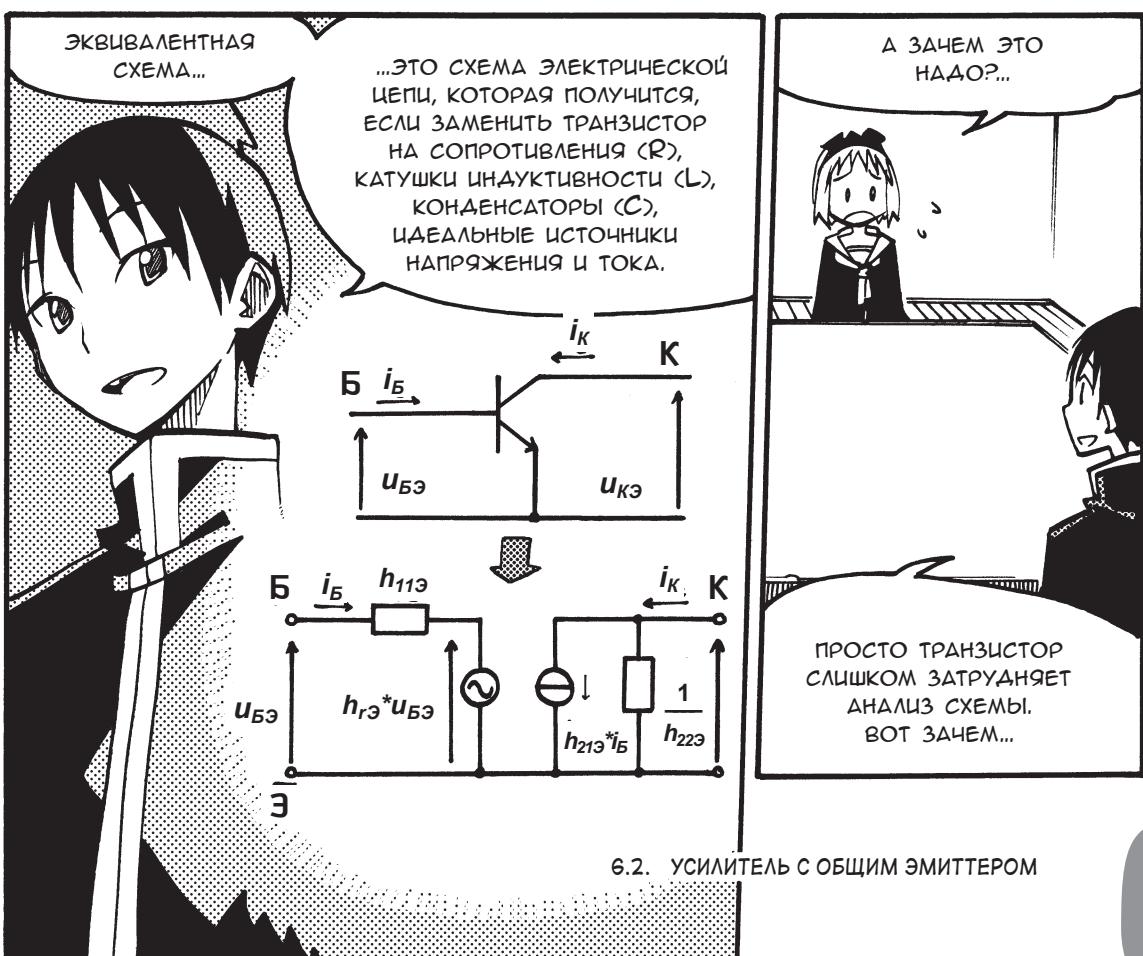


Рис. 6-1 Усилитель с общим эмиттером

ВОТ УСИЛИТЕЛЬ
С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ!
БЛАГОДАРЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
ЭТОЙ СХЕМЫ ВЫХОДНОЙ
ТОК СТАНОВИТСЯ В 100 РАЗ
БОЛЬШЕ ВХОДНОГО!



6.2.1. Эквивалентная схема



6.2.2. Цепь смещения



ПОЭТОМУ ПОПРОБУЕМ ОТДЕЛИТЬ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО.

И ВПРАВДУ, СТАЛО НАМНОГО ПОНЯТНЕЕ!

Выделяем из схемы цепь постоянного тока

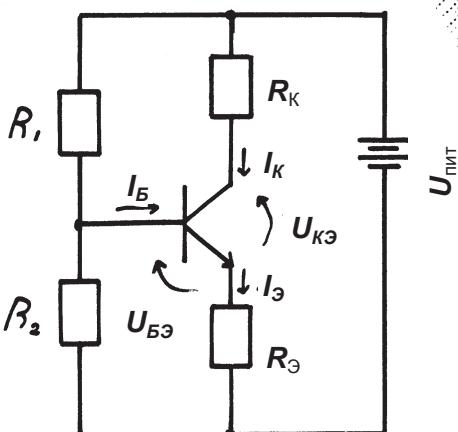


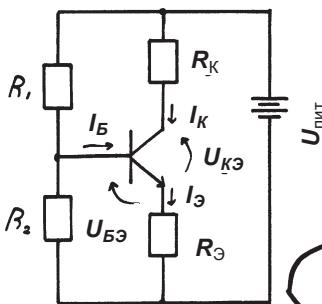
Рис.6-2 Цепь смещения усилителя с общим эмиттером

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

ПРИ ЭТОМ МЫ УЧИЛИ, 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.



ДА.



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,

КРОМЕ

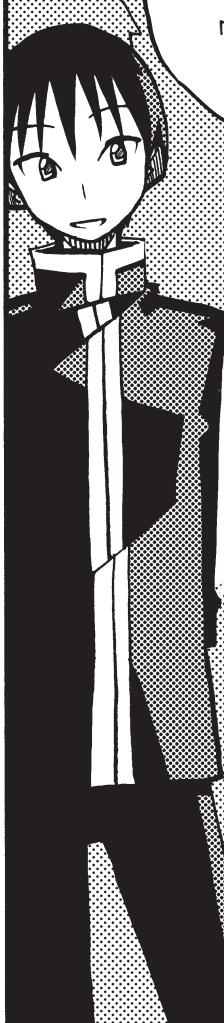
ТОГО, ЕСЛИ СЧИТАТЬ, ЧТО ПОДАВЛЯЮЩЕЕ БОЛЬШИНСТВО ЭЛЕКТРОНОВ, ВХОДЯЩИХ В КОЛЛЕКТОР ИЗ ПРОВОДА, ДОСТИГАЮТ ЭМИТЕРА, ТО МОЖНО ПОЛОЖИТЬ $I_k \approx I_e$, СЛЕДОВАТЕЛЬНО:

$$U_{\text{пит.}} \approx R_k * I_k + U_{k\bar{e}} + R_e * I_e$$

ТО ВОТ ЧТО ПОЛУЧИТСЯ.

$$U_{\text{пит.}} \approx U_{k\bar{e}} + (R_k + R_e) * I_k$$

ДА,
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 ТОКА), ТО ЕСТЬ ГРАФИК ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЛЛЕКТОРНОГО ТОКА $I_{\text{К}}$ ОТ КОЛЛЕКТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $U_{\text{КЭ}}$.

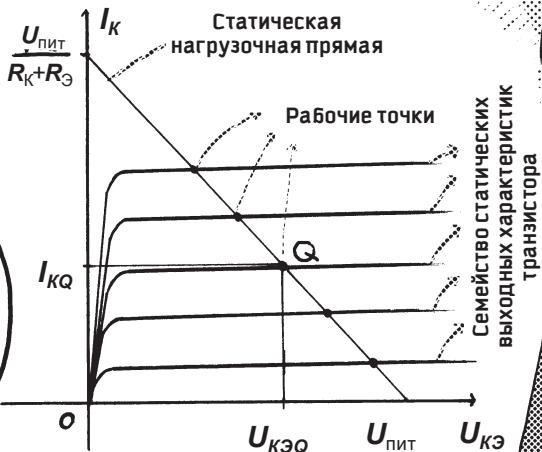


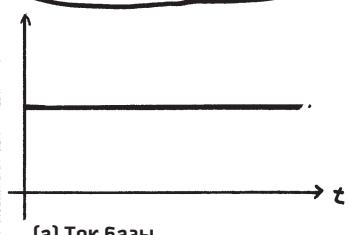
Рис. 6-3 Статическая нагрузочная прямая

КРОМЕ ТОГО, НА РИСУНКЕ ТАКЖЕ ПОКАЗАНЫ КРИВЫЕ СТАТИЧЕСКИХ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА, А ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ЭТИХ КРИВЫХ С НАГРУЗОЧНОЙ ПРЯМОЙ НАЗЫВАЮТСЯ «РАБОЧИМИ ТОЧКАМИ».

НА РИСУНКЕ У НАС ИХ ЦЕЛЫХ ПЯТЬ!

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

...БЕРЁМ ТОК БАЗЫ...



[а] Ток базы

...СИГНАЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА...



[б] Сигнал переменного тока

И НАКЛАДЫВАЕМ СИГНАЛ НА ТОК!



[в] Результат наложения

ЭТО ПОЗВОЛИТ НАМ ДОБЫТЬСЯ УСИЛЕНИЯ.

ВОТ КАК!
ПОНЯТО!

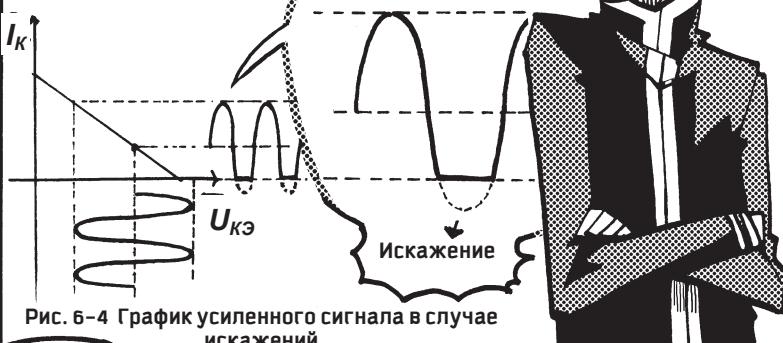
<Оптимальная рабочая точка>

РАБОЧУЮ ТОЧКУ **Q** НУЖНО ВЫБИРАТЬ ОСТОРОЖНО.

ПРАВДА?

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

ЭТА ОПТИМАЛЬНАЯ РАБОЧАЯ ТОЧКА **Q** РАССЧИТЫВАЕТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ ФОРМУЛАМ.

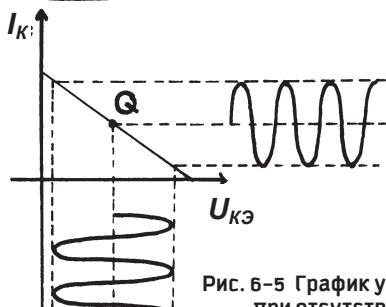


$$U_{KЭQ} = \frac{1}{2}U_{пит}$$

$$I_{KQ} = \frac{1}{(R_K + R_\Theta)}U_{пит}$$

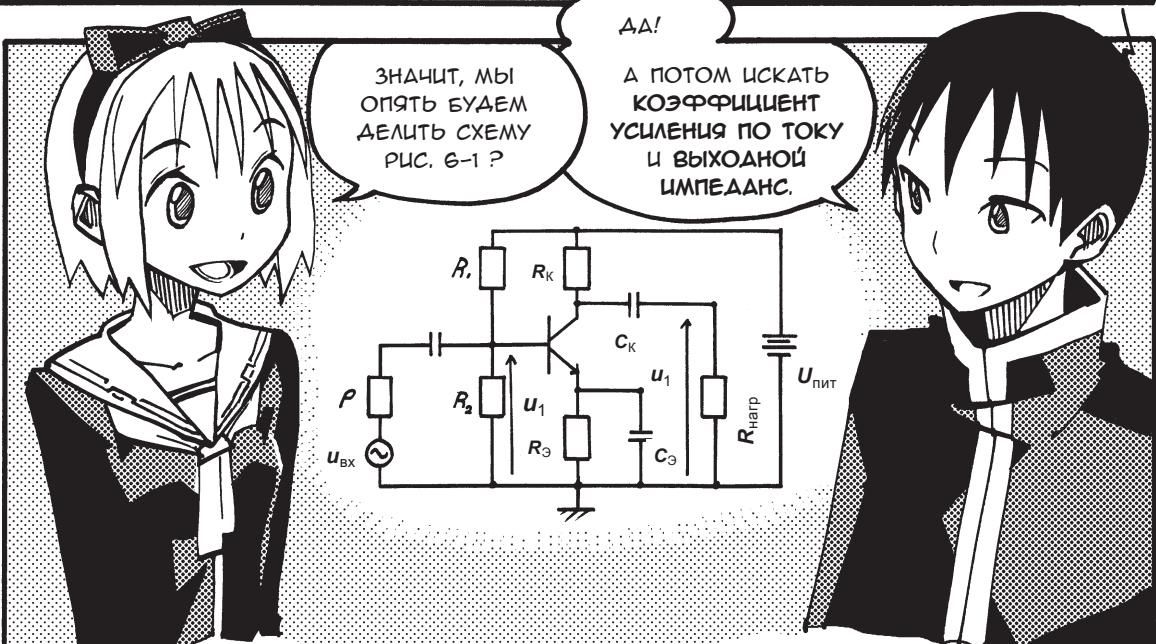
ПОЭТОМУ

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





6.2.3. Схема усиления переменного тока

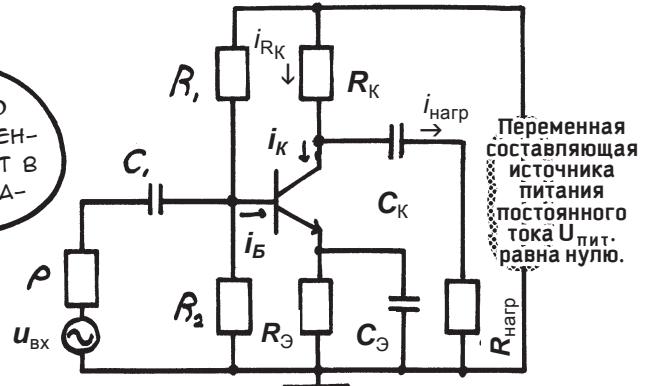


«Эквивалентная схема для переменного тока»



ЭКВИВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТРОЯТ В ТАКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.

Рис. 6-6



Переменная составляющая источника питания постоянного тока $U_{\text{пит.}}$ равна нулю.

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

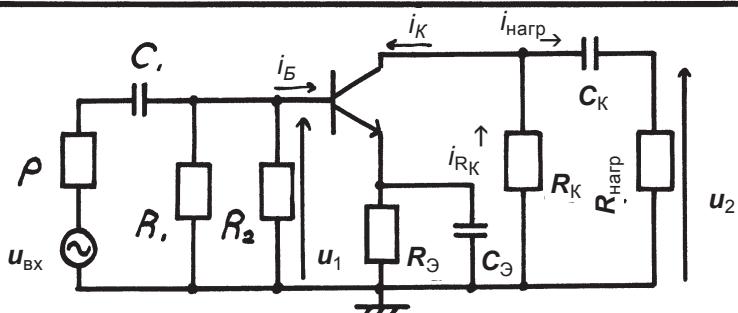
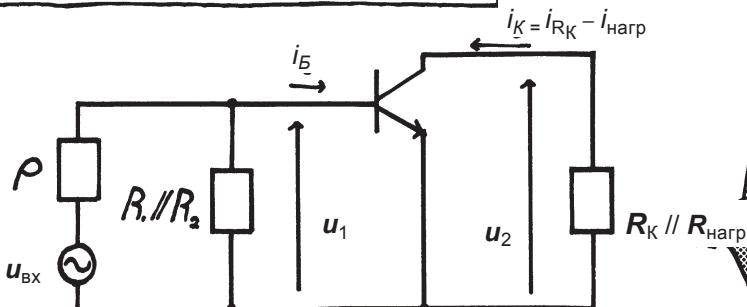


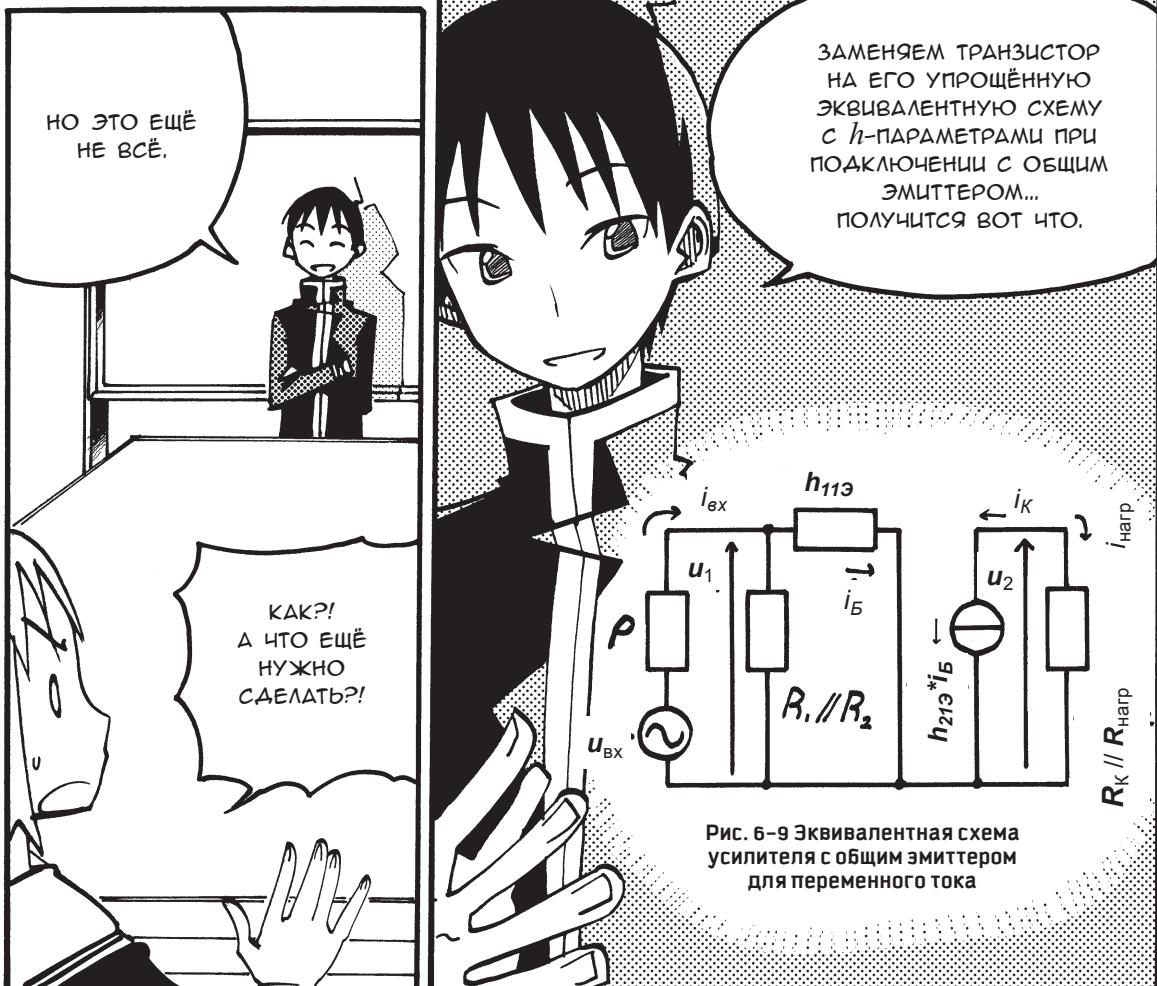
Рис. 6-7

(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 ОБЪЯСНОЮ
ПРО «КОЭФФИЦИЕНТ
УСИЛЕНИЯ ПО ТОКУ».

ОЙ, А ЧТО ЭТО?

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ПО
ТОКУ K_i ПОКАЖЕТ НАМ, ВО
СКОЛЬКО РАЗ ВЫХОДНОЙ
ТОК $i_{\text{нагр}}$ БУДЕТ БОЛЬШЕ
ВХОДНОГО ТОКА $i_{\text{вх}}$.

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

Выходной
ток

Коэффи-
циент уси-
ления по
току

Входной
ток

ЕСЛИ K_i БУДЕТ БОЛЬШЕ ЕДИНИЦЫ,
ТО...

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

...ВЫХОД ПО ТОКУ ПРЕВЫСИТ ВХОД!

ДА! ТАК И ЕСТЬ!

ЕСЛИ $K_i > 1$, ТО МОЖНО ГОВОРЬТЬ
ОБ УСИЛЕНИИ!

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

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

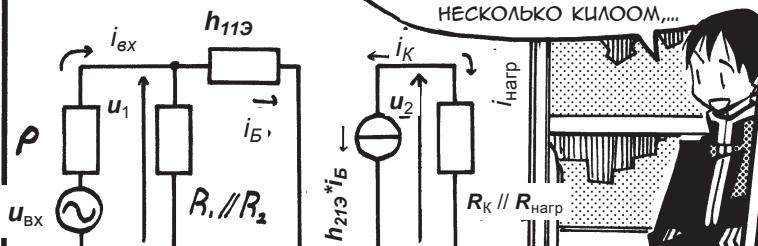
ДАВАЙ!

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

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

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

ТОК, ТЕКУЩИЙ ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ
 $R_1//R_2$ ОЧЕНЬ МАЛ ПО СРАВНЕНИЮ С
ТОКОМ, ТЕКУЩИМ ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕ-
НИЕ $h_{11\Theta}$. АРУГИМИ СЛОВАМИ, ОБЫЧНО
СОПРОТИВЛЕНИЕ $R_1//R_2$ СОСТАВЛЯЕТ
НЕСКОЛЬКО КИЛООМ...



...А
СОПРОТИВЛЕНИЕ $h_{11\Theta}$ - ВСЕГО НЕ-
СКОЛЬКО ДЕСЯТКОВ ОМ, ПОЭТОМУ
БОЛЬШАЯ ЧАСТЬ ТОКА, СОЗДАВАЕ-
МОГО ИСТОЧНИКОМ $u_{\text{вх}}$ ПОЙДЁТ
ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ $h_{11\Theta}$.

ПОЭТОМУ МОЖНО
СЧИТАТЬ, ЧТО

$$i_B \approx i_{\text{вх}}$$

$$i_{\text{нагр}} \approx -i_K = -h_{21\Theta} \cdot i_B$$

...А ЗНАЧИТ,
 $K_i = -h_{21\Theta} \cdot i_B$

ДАЛЕЕ, $h_{21\Theta} \dots$

$$h_{21\Theta} = \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

...ВЫЧИСЛЯЕТСЯ ВОТ
ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ.

<Коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером>

ЗДЕСЬ α – ЭТО КОНСТАНТА, НАЗЫВАЕМАЯ «КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ЭМИТТЕРНОГО ТОКА». ПОЧТИ ДЛЯ ВСЕХ ТРАНЗИСТОРОВ $0,95 < \alpha < 1,0$.

ЗНАЧИТ, ОН БЕСКОНЕЧНО ПРИБЛИЖАЕТСЯ К ЕДИНИЦЕ!

НАПРИМЕР, ЕСЛИ ПОДСТАВИТЬ СЮДА $\alpha = 0,99$, ЧЕМУ БУДЕТ РАВЕН K_i ?

$$K_i = -\frac{0,99}{1 - 0,99}$$

K_i БУДЕТ РАВЕН МИНУС 99!

ДА!

ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ТОК НАГРУЗКИ $i_{\text{нагр}}$ БУДЕТ БОЛЬШЕ ВХОДНОГО ТОКА $i_{\text{вх}}$ ПОЧТИ В 100 РАЗ.

ПОНЯТНО!
ВОТ ПОЧЕМУ В 100 РАЗ!

<Инверсия фазы>

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

ЯСНО!

ОЙ, КАК Я СРАЗУ НЕ ЗАМЕТИЛА! ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА 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.

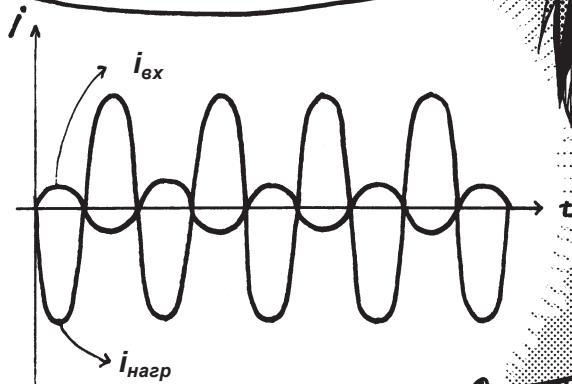


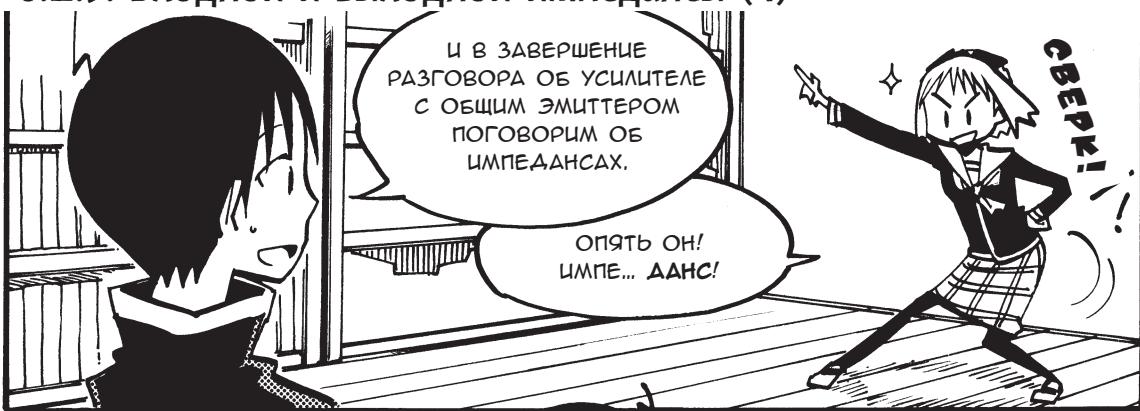
Рис. 6-10 Инверсия фазы



МОЖЕТ БЫТЬ, И У НАС С ТОБОЙ ФАЗЫ ПРОТИВОПОЛОЖНЫ.

ЧТО ТЫ ДЕЛАЕШЬ, АЯ?

6.2.5. Входной и выходной импедансы (1)

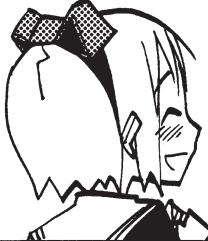


<Входной импеданс $Z_{\text{вх}}$ [1]>



<Выходной импеданс $Z_{\text{вых}}$ [1]>

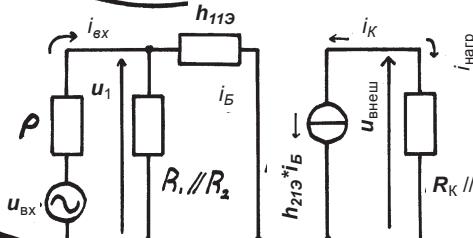
ТЕПЕРЬ РАССМОТРИМ
ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС
 $Z_{\text{вых}}$.



$Z_{\text{вых}}$ – 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...



ПОЭТОМУ ТОК УПРАВЛЯЕМОГО
ИСТОЧНИКА ТОКА ТОЖЕ РАВЕН
НУЛЮ:
 $-h_{21e} \cdot i_B = 0$
 $(= i_K)$

ВЫХОДНОЙ
ИМПЕДАНС
РАССЧИТАЫВАЕТСЯ
ТАК!

$$Z_{\text{вых}} = \frac{u_{\text{внеш}}}{i_{\text{вых}}} \Big|_{u_{\text{вых}} = 0} = \infty$$

ПРИ ТАКОМ БОЛЬШОМ
ВЫХОДНОМ ИМПЕДАНСЕ МЫ
НЕ УСЛЫШИМ ЗВУКА, ЕСЛИ
НАПРЯМУЮ ПОДКЛЮЧИМ
УСИЛИТЕЛЬ К
ГРОМКОГОВОРИТЕЛЮ.

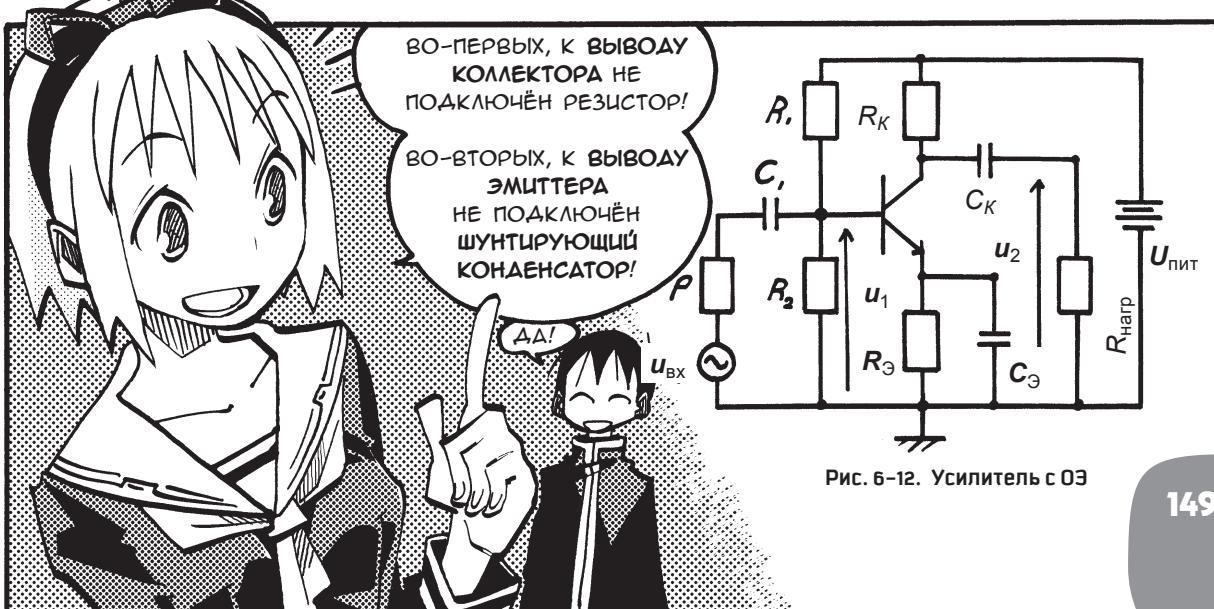
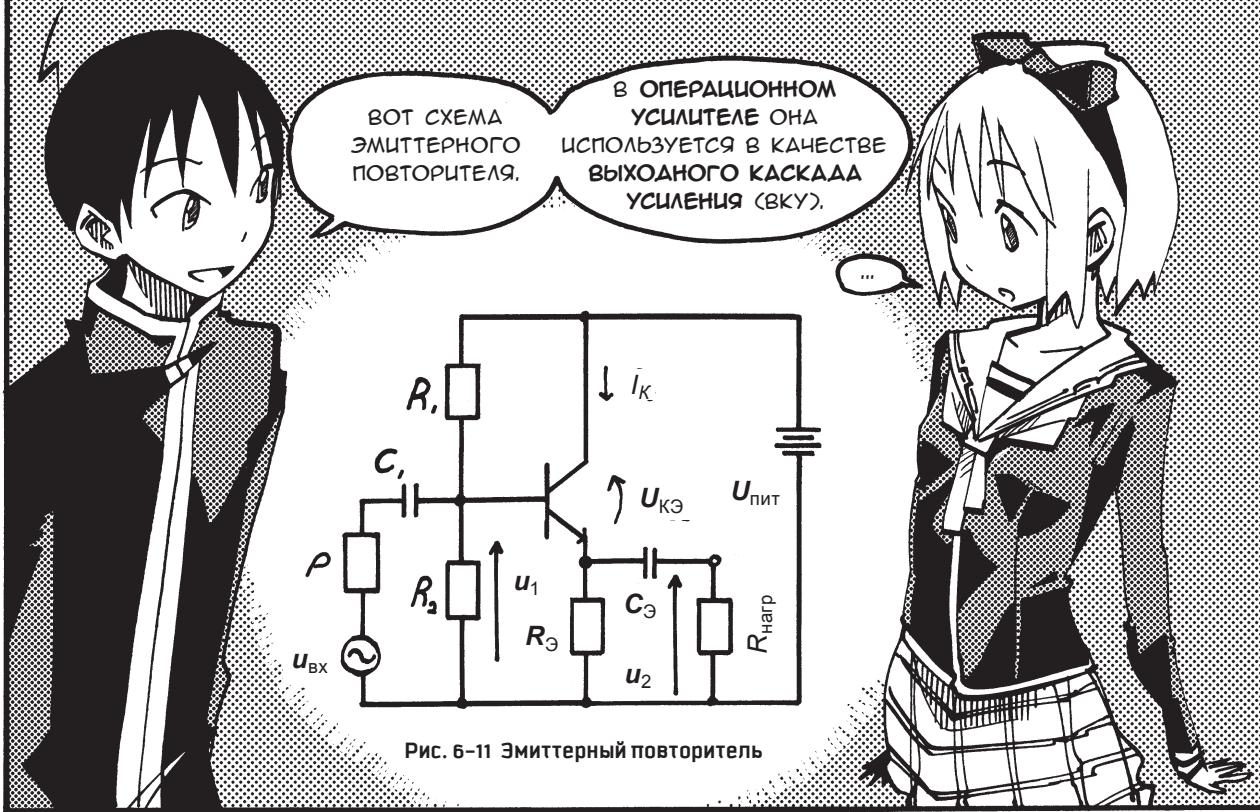
КАК?
ПОЧЕМУ ЖЕ?!



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!

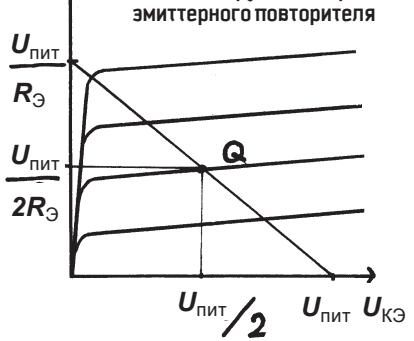
ТО ЕСТЬ, ЦЕПЬ ДЛЯ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ДА?

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

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



Рис. 6-14 Нагрузочная прямая эмиттерного повторителя



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

Рис. 6-13 Схема эмиттерного повторителя для постоянного тока

$$U_{K\mathcal{E}Q} = \frac{U_{\text{пит}}}{2}; \quad I_{KQ} = \frac{U_{\text{пит}}}{2R_{\mathcal{E}}}$$

...НАХОДИТСЯ
ВОТ ТАК!

6.3.3. Эквивалентная схема для переменного тока

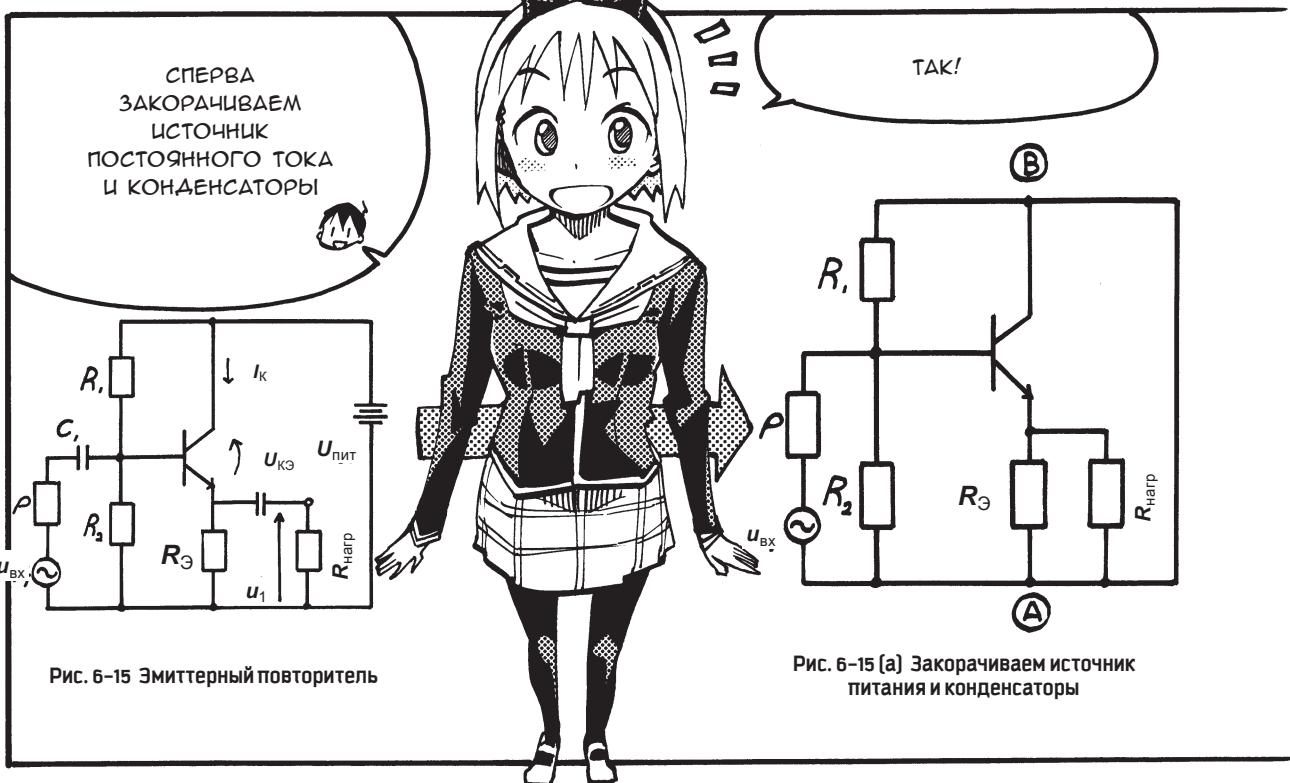


Рис. 6-15 Эмиттерный повторитель



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

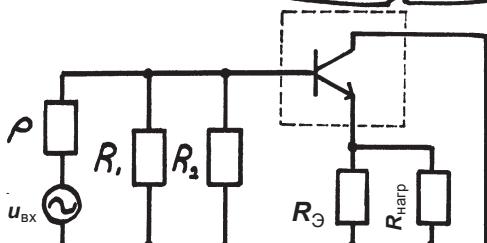


Рис. 6-15 [б]

КРОМЕ ТОГО, ЧАСТЬ СХЕМЫ, ОБВЕДЁННУЮ НА РИС. 6-15(б) ШТРИХОВОЙ ЛИНИЕЙ,

...ТО ЕСТЬ ТРАНЗИСТОР, МЫ ЗАМЕНИМ НА ЭКВИВАЛЕНТНУЮ СХЕМУ С h -ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ С ОБЩИМ ЭМИТЕРОМ.

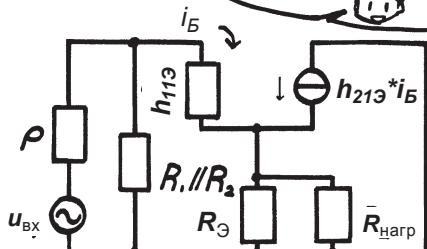


Рис. 6-15 [в]

НО ЭТА СХЕМА КАКАЯ-ТО СЛИШКОМ СЛОЖНАЯ...

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

...ЧТОБЫ СОПРОТИВЛЕНИЕ НАГРУЗКИ $R_{нагр}$ ОКАЗАЛОСЬ НА ПРАВОМ КРАЮ СХЕМЫ.

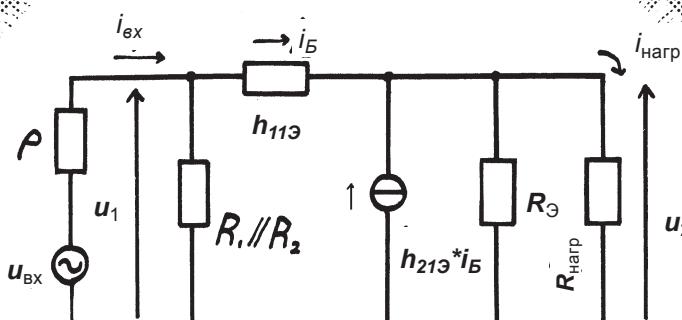
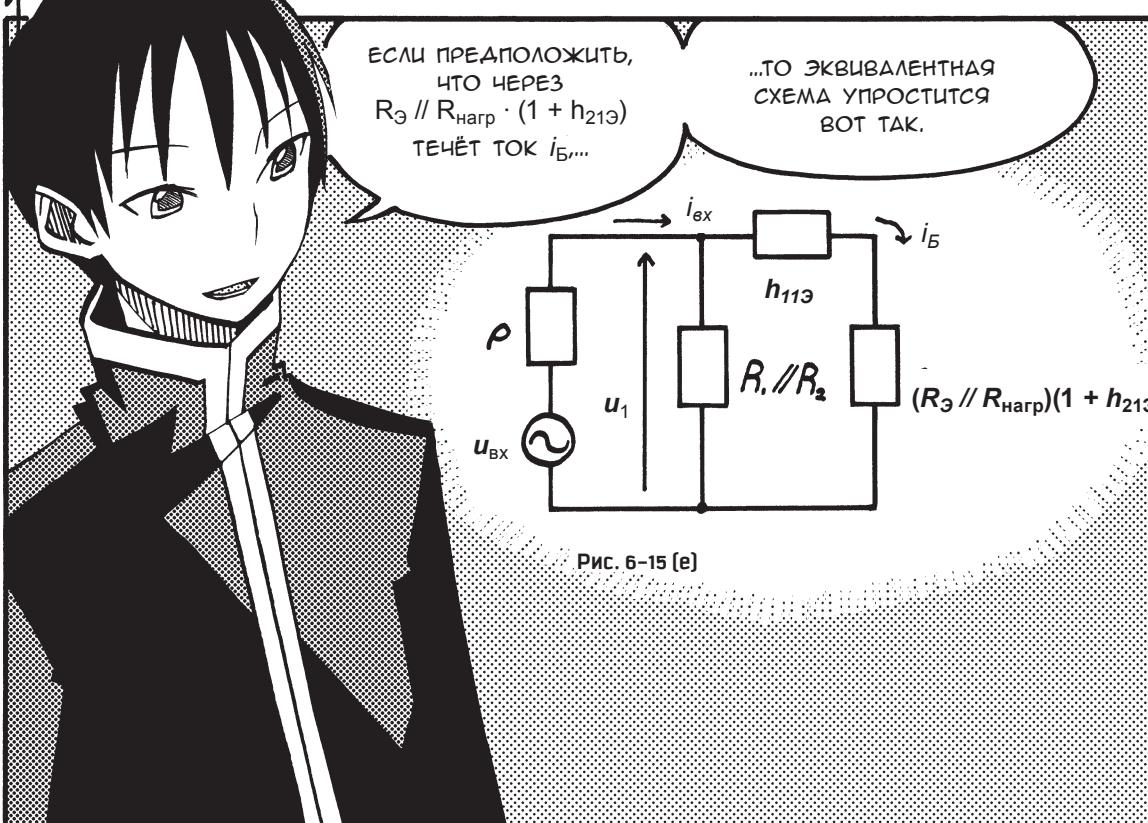
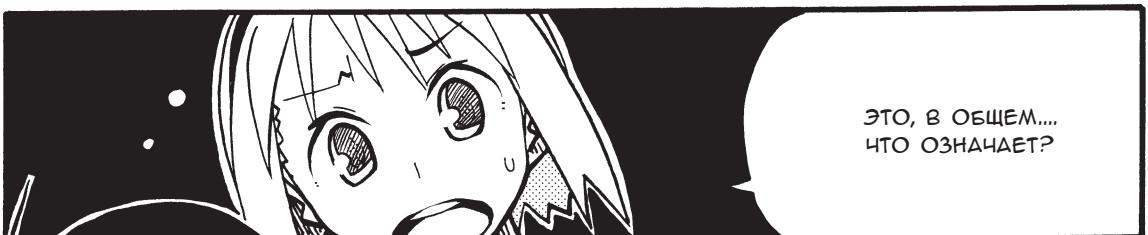
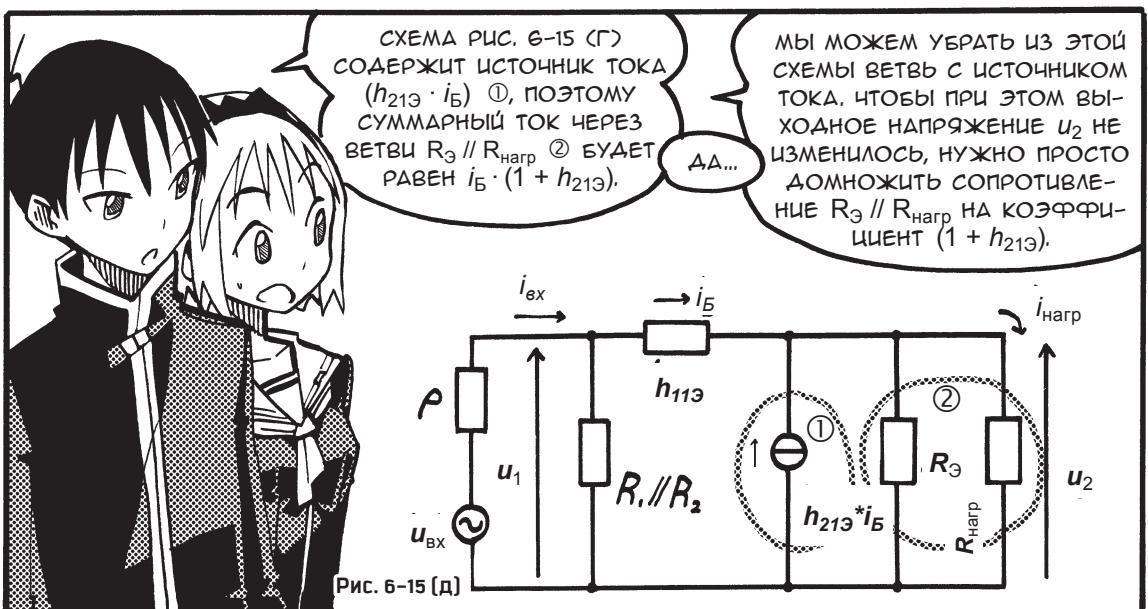
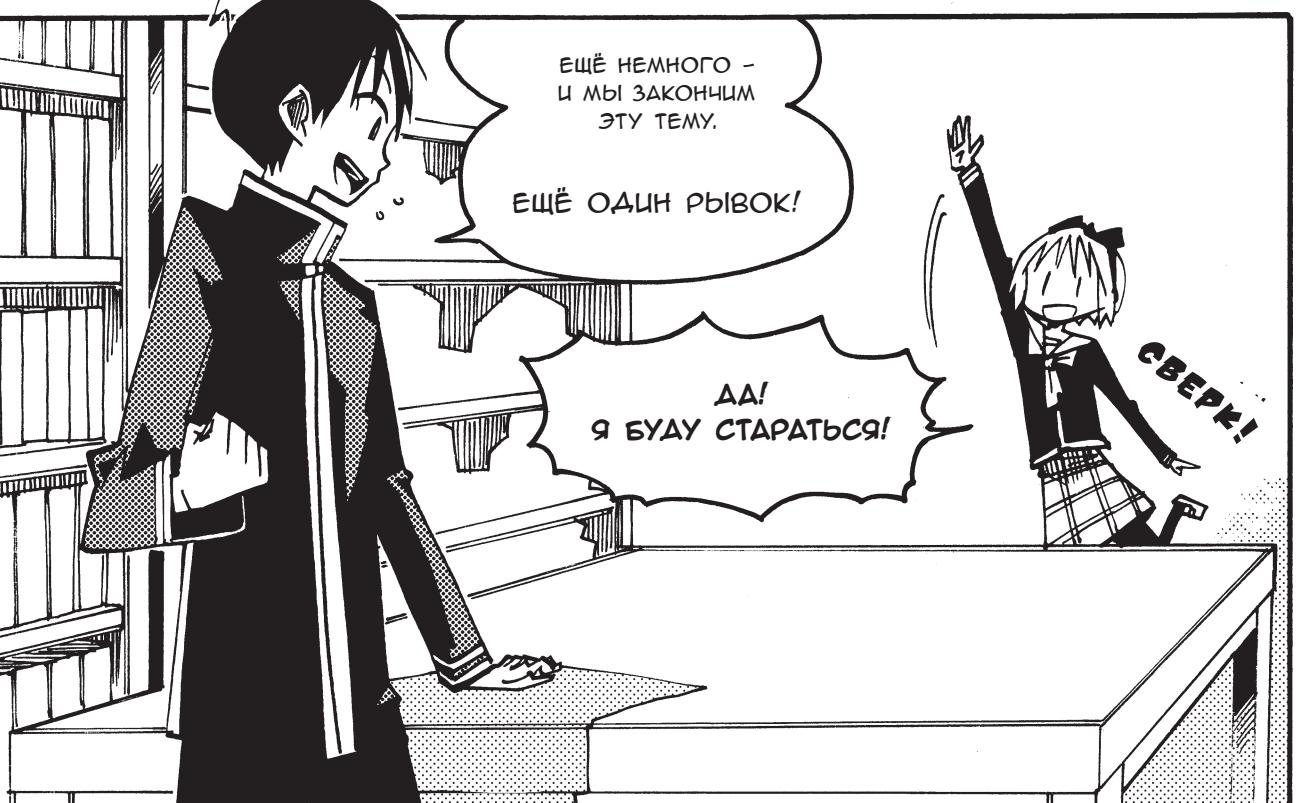


Рис. 6-15 [г]

СТАЛО НАМНОГО ПРОЩЕ!





6.3.4. Коэффициенты усиления по напряжению и току

<Коэффициент усиления по напряжению>



НО В СЛУЧАЕ ЭМИТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ СПЕРВА ПРИДЁТЬСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ ТАКЖЕ «КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ».



<Коэффициент усиления по току>

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

ДА!
УЖ ЭТО Я ЗАПОМНИЛА...

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

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

...БУДЕТ ВОТ
ТАКИМ!

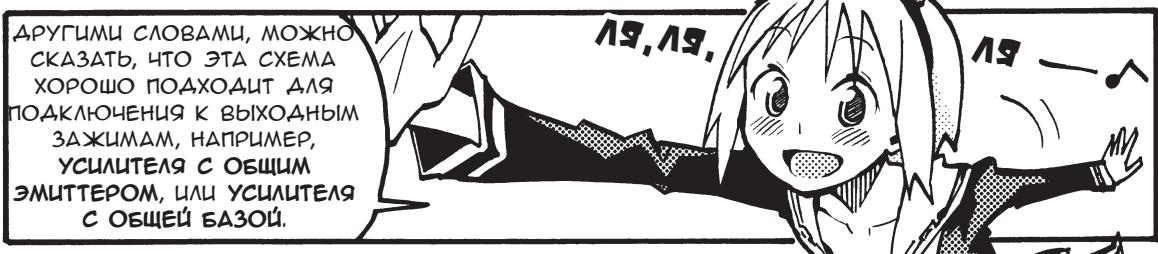
ТАК КАК ЗНАЧЕНИЕ $h_{21\beta}$
СОСТАВЛЯЕТ ПРИМЕРНО 50-100,
МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ВЫХОДНОЙ
СИГНАЛ С ТОКОМ, В 50-100 РАЗ
ПРЕВЫШАЮЩИМ ТОК ВХОДНОГО
СИГНАЛА.

ПОНЯТНО!

ПОЭТОМУ «УСИЛЕНИЕ» ПО ТОКУ БУДЕТ!

6.3.5. Входной и выходной импедансы (2)

**<Входной импеданс
 $Z_{\text{вх}}$ (2)>**

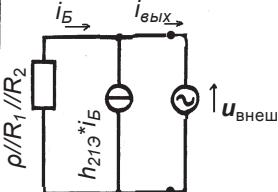


<Выходной импеданс Z_{вых} (2)>

ТЕПЕРЬ ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС!



ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС Z_{вых} ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ ВЫЧИСЛЯЕТСЯ ПО ТОЙ ЖЕ МЕТОДИКЕ, КАК ДЛЯ УСИЛИТЕЛЯ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ.



ЗДЕСЬ МЫ ПРЕНЕБРЕГАЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ПОДКЛЮЧЁННЫМ h_{11\beta}, ТАК КАК ОНО ОЧЕНЬ МАЛО, И ПАРАЛЛЕЛЬНО ПОДКЛЮЧЁННЫМ R₃, ТАК КАК ОНО ОЧЕНЬ ВЕЛИКО.

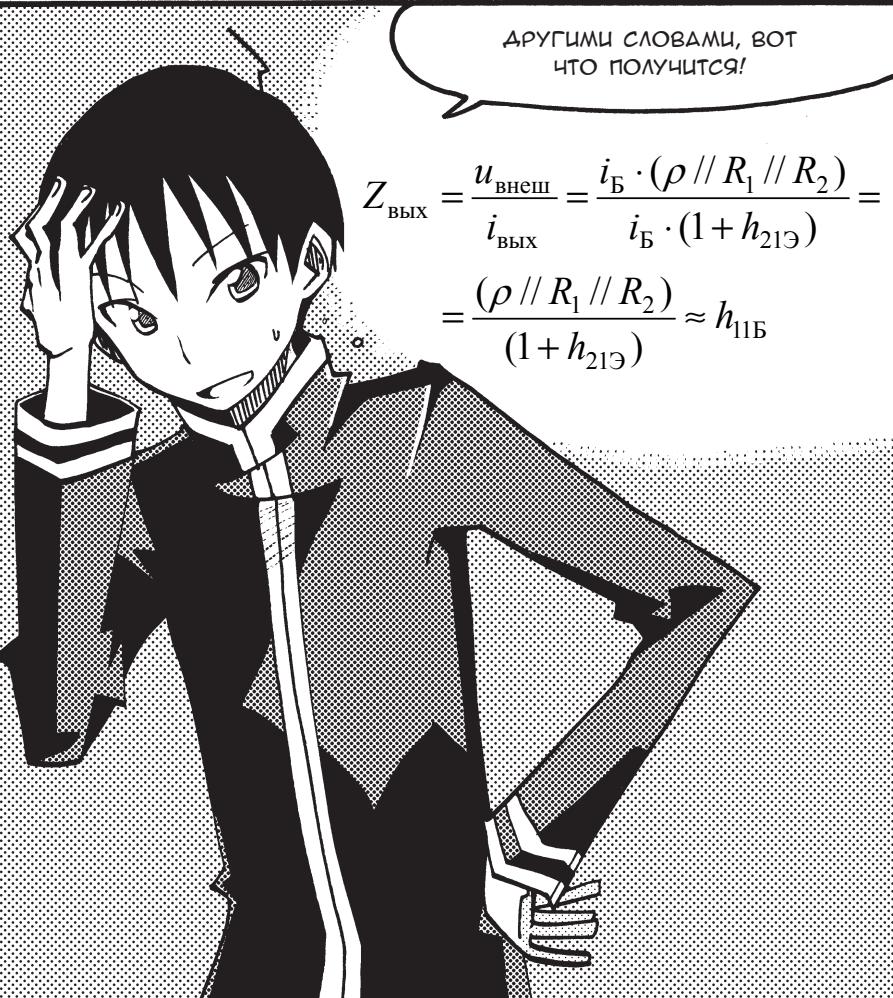
$$i_{\text{вых}} = i_{\text{Б}} + h_{21\beta} * i_{\text{Б}} = i_{\text{Б}} (1 + h_{21\beta})$$

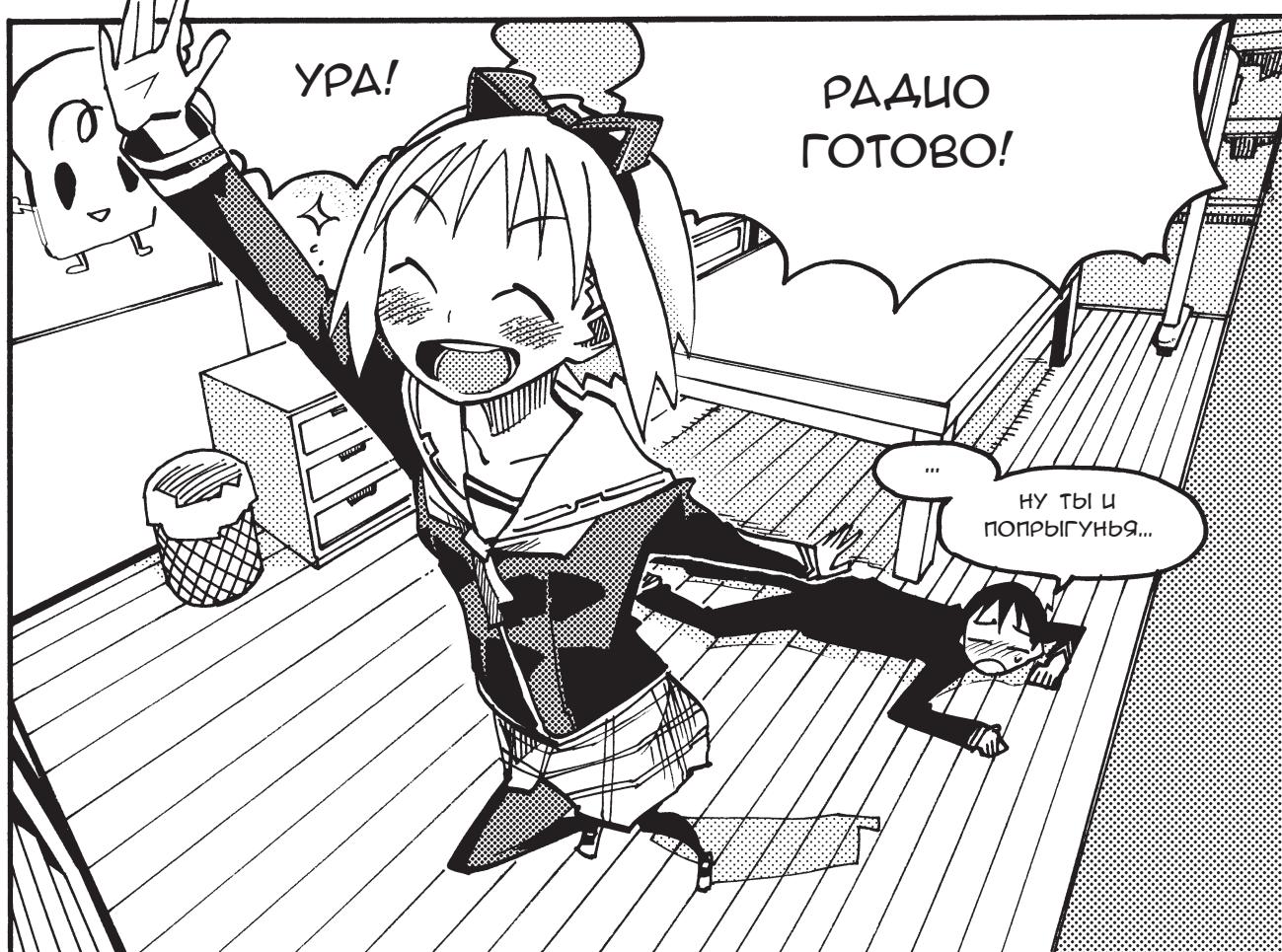
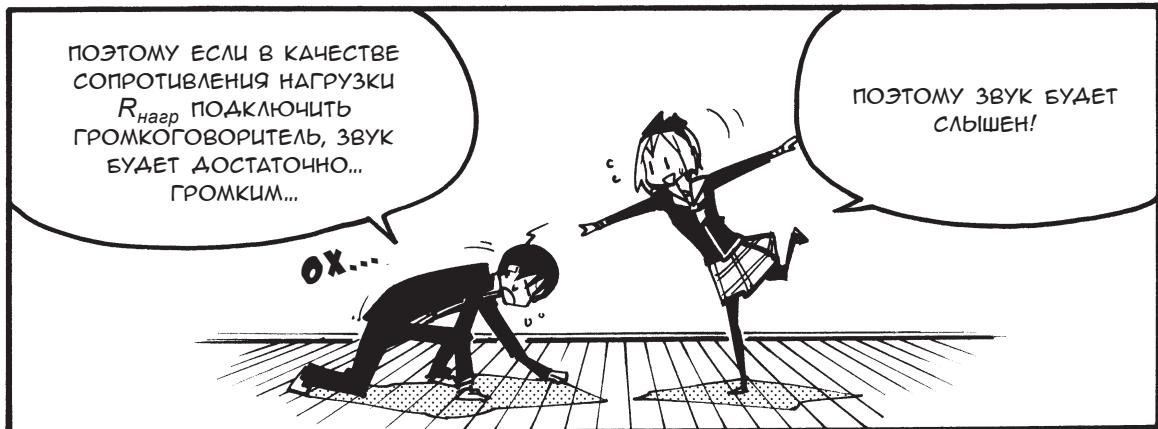
ТАК КАК i_Б = 0 НЕ БУДЕТ ВЫПОЛНЯТЬСЯ ДАЖЕ ПРИ U_{вх} = 0, ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС Z_{вых} НЕ ЯВЛЯЕТСЯ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШИМ.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ВОТ ЧТО ПОЛУЧИТСЯ!

$$\begin{aligned} Z_{\text{вых}} &= \frac{U_{\text{внеш}}}{i_{\text{вых}}} = \frac{i_{\text{Б}} \cdot (\rho // R_1 // R_2)}{i_{\text{Б}} \cdot (1 + h_{21\beta})} = \\ &= \frac{(\rho // R_1 // R_2)}{(1 + h_{21\beta})} \approx h_{11\beta} \end{aligned}$$

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





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 децибелях (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 $h_{21\Theta}$ 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 громкоговорителю, 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 громкоговорителе, в результате чего потребляемая громкоговорителем электрическая мощность, которая является источником энергии звука, практически исчезнет.

Следовательно, звука в громкоговорителе 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.

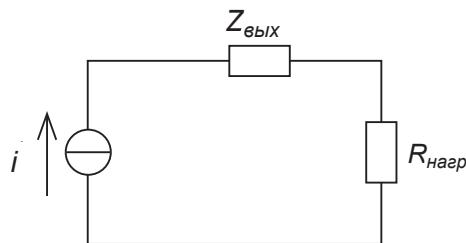


Рис. 6-А1 Выходной импеданс $Z_{вых}$ и сопротивление нагрузки $R_{нагр}$.

► Что произойдёт при каскадном включении эмиттерного повторителя?

Если соединить усилитель с общим эмиттером и эмиттерный повторитель так, как показано на рис. 6-А2, 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-А2 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.

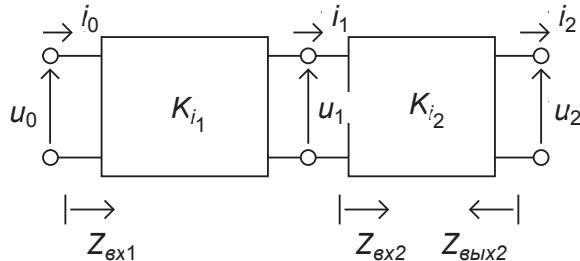


Рис. 6-А3 Представление о каскадировании усилителей

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

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

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

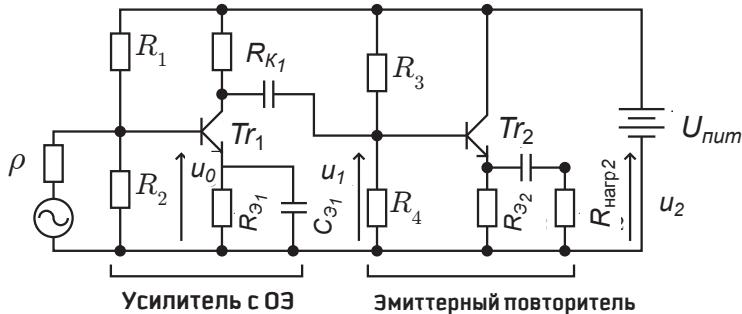


Рис. 6-А4 Каскадирование усилителя с ОЭ и эмиттерного повторителя

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.

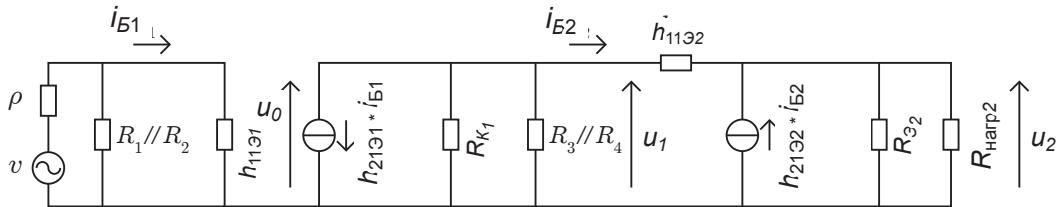


Рис. 6-А5 Эквивалентная схема переменного тока для схемы рис. 6-А4

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:

$$i_0 = i_{B1}$$

$$i_1 = i_{B2} = -h_{21\Theta 1} \cdot i_{B1} \cdot \frac{R_{K1} // R_3 // R_4}{R_{K1} // R_3 // R_4 + Z_{\text{вх}2}}$$

$$K_{i1} = \frac{i_1}{i_0} = -h_{21\Theta 1} \cdot \frac{R_{K1} // R_3 // R_4}{R_{K1} // R_3 // R_4 + Z_{\text{вх}2}}$$

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

Однако том в случае, если $R_{K1} // R_3 // R_4 \gg Z_{\text{вх}2}$, можно считать $K_{i1} = -h_{21\Theta 1}$.

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

$$K = K_{i1} \cdot K_{i2} = -h_{21\Theta 1} \cdot (1 + h_{21\Theta 2}) \cdot \frac{R_{K1} // R_3 // R_4}{R_{K1} // R_3 // R_4 + Z_{\text{вх}2}} \approx \\ \approx -h_{21\Theta 1} \cdot (1 + h_{21\Theta 2}),$$

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.

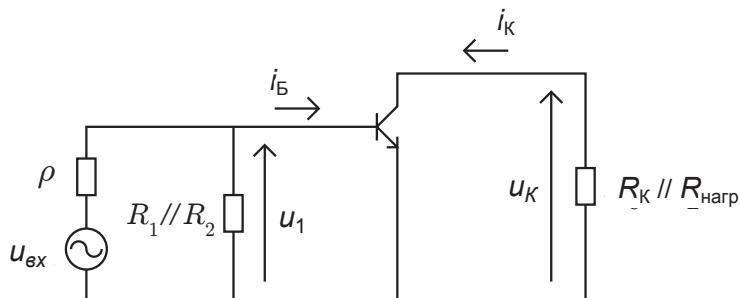


Рис. 6-А6 Схема усилителя с ОЭ для переменной составляющей тока

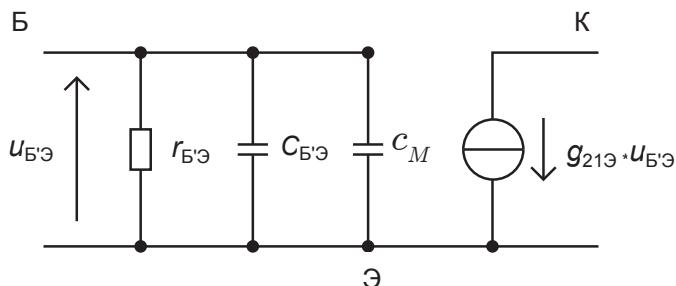


Рис. 6-А7 Эквивалентная схема транзистора для высоких частот

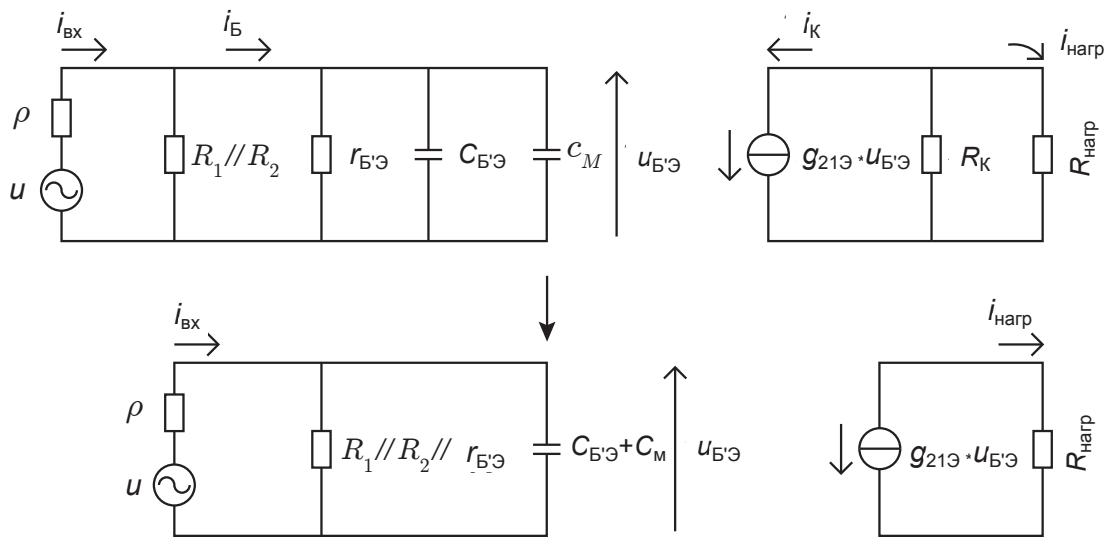


Рис. 6-А8 Эквивалентная схема усилителя с ОЭ для высоких частот ($R_K \gg R_{\text{нагр}}$)

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.

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

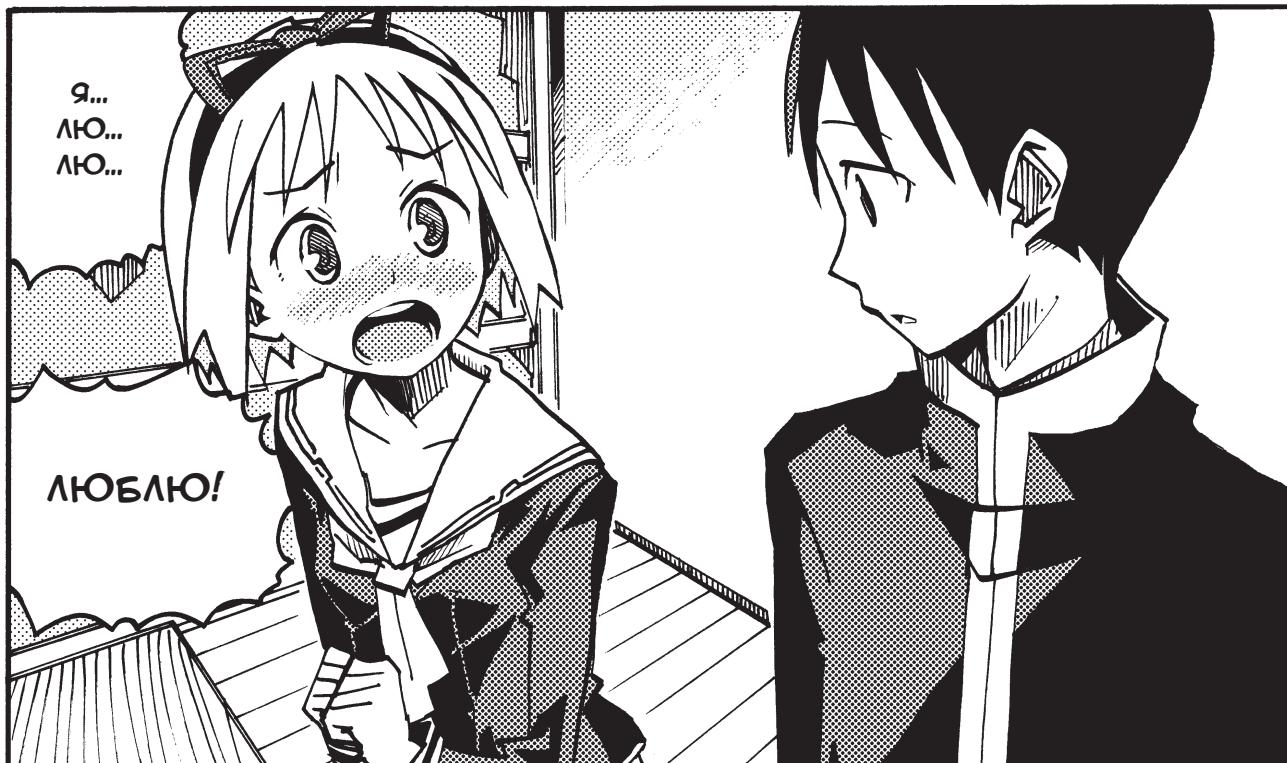
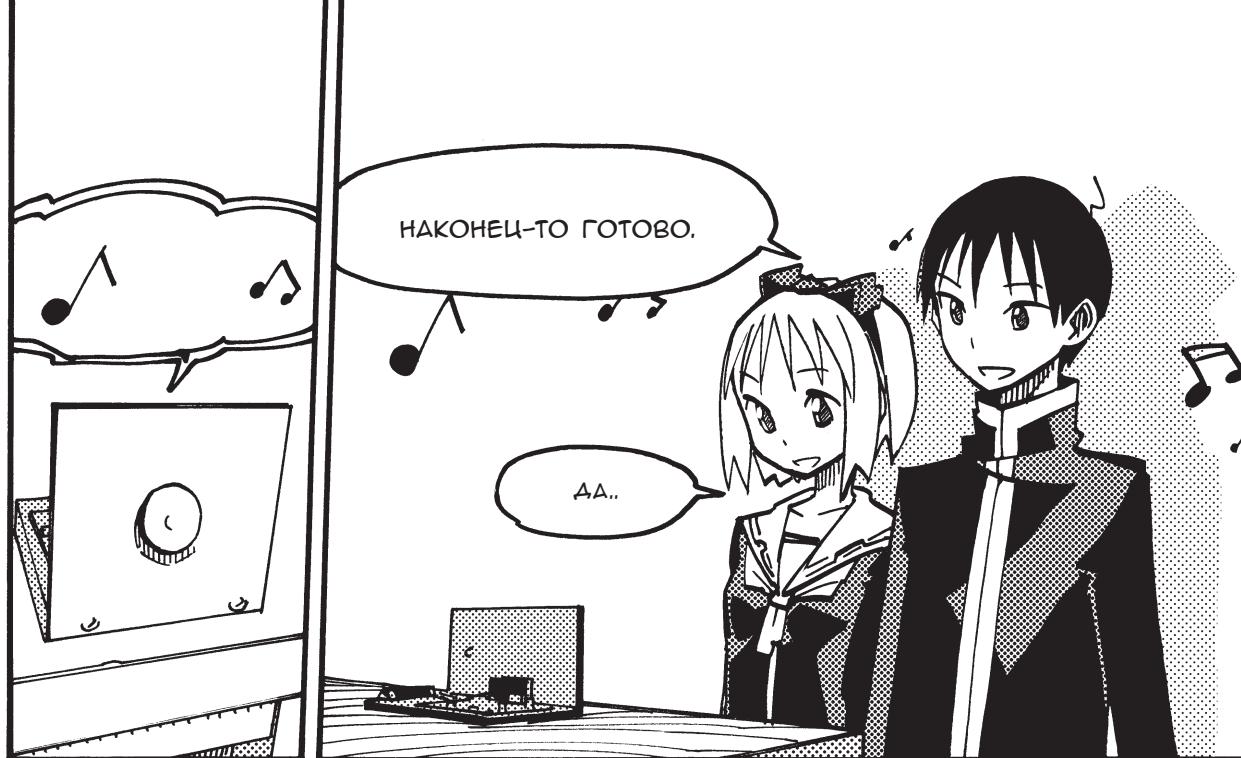
$$i_{\text{нагр}} = g_{21\Theta} \cdot u_{Б'Э} \cdot \left(\frac{R_K}{R_K + R_{\text{нагр}}} \right) \approx g_{21\Theta} \cdot u_{Б'Э} \quad (R_K \gg R_{\text{нагр}})$$

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

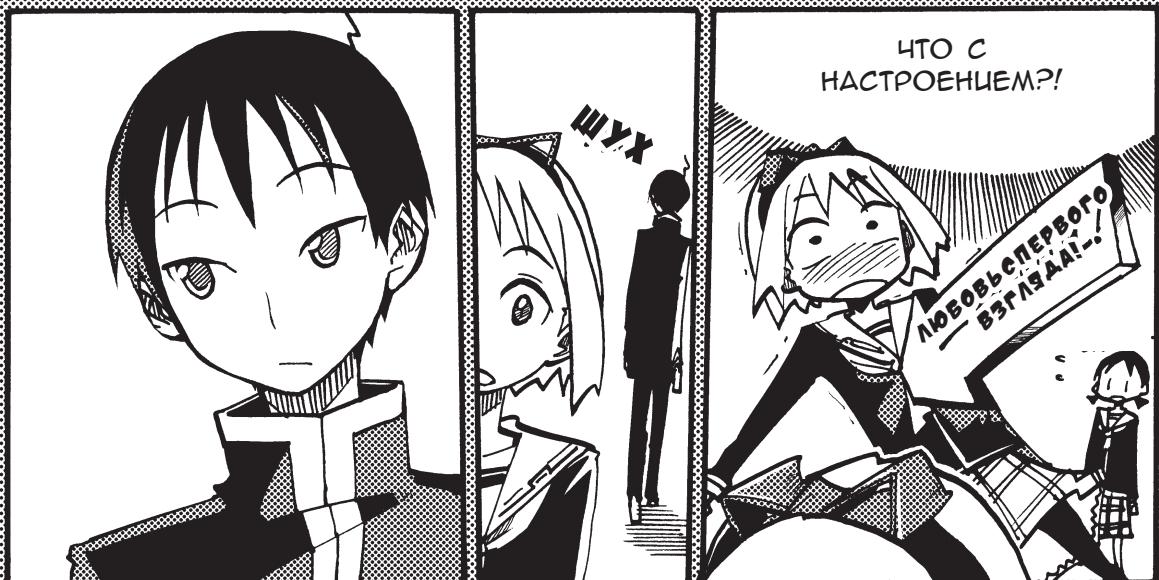
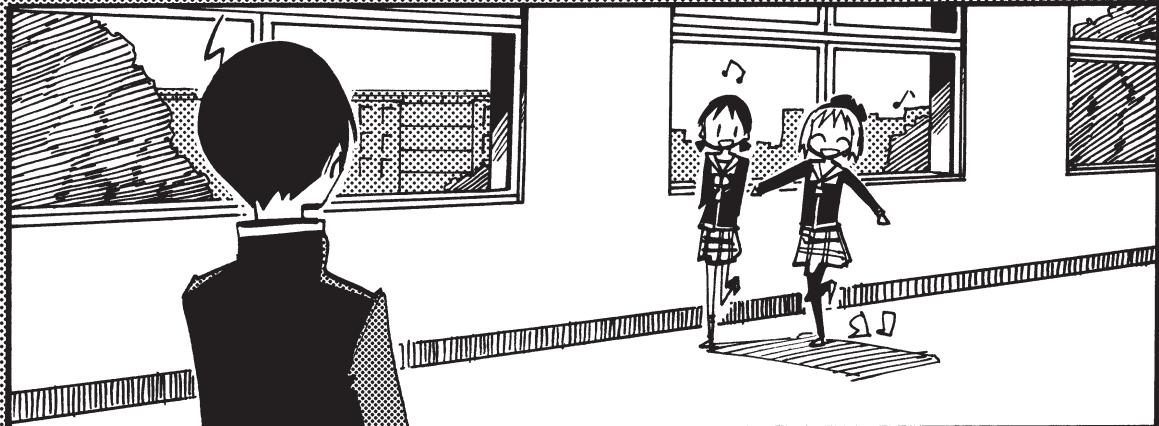
Здесь K_i является функцией угловой частоты ω , и можно сказать, что когда угловая частота превышает значение

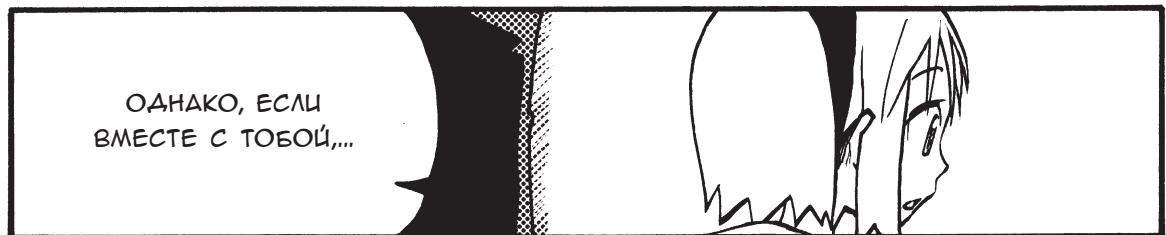
$$\omega = \frac{1}{(C_{B'E} + C_M) \cdot (R_1 // R_2 // r_{B'E})},$$

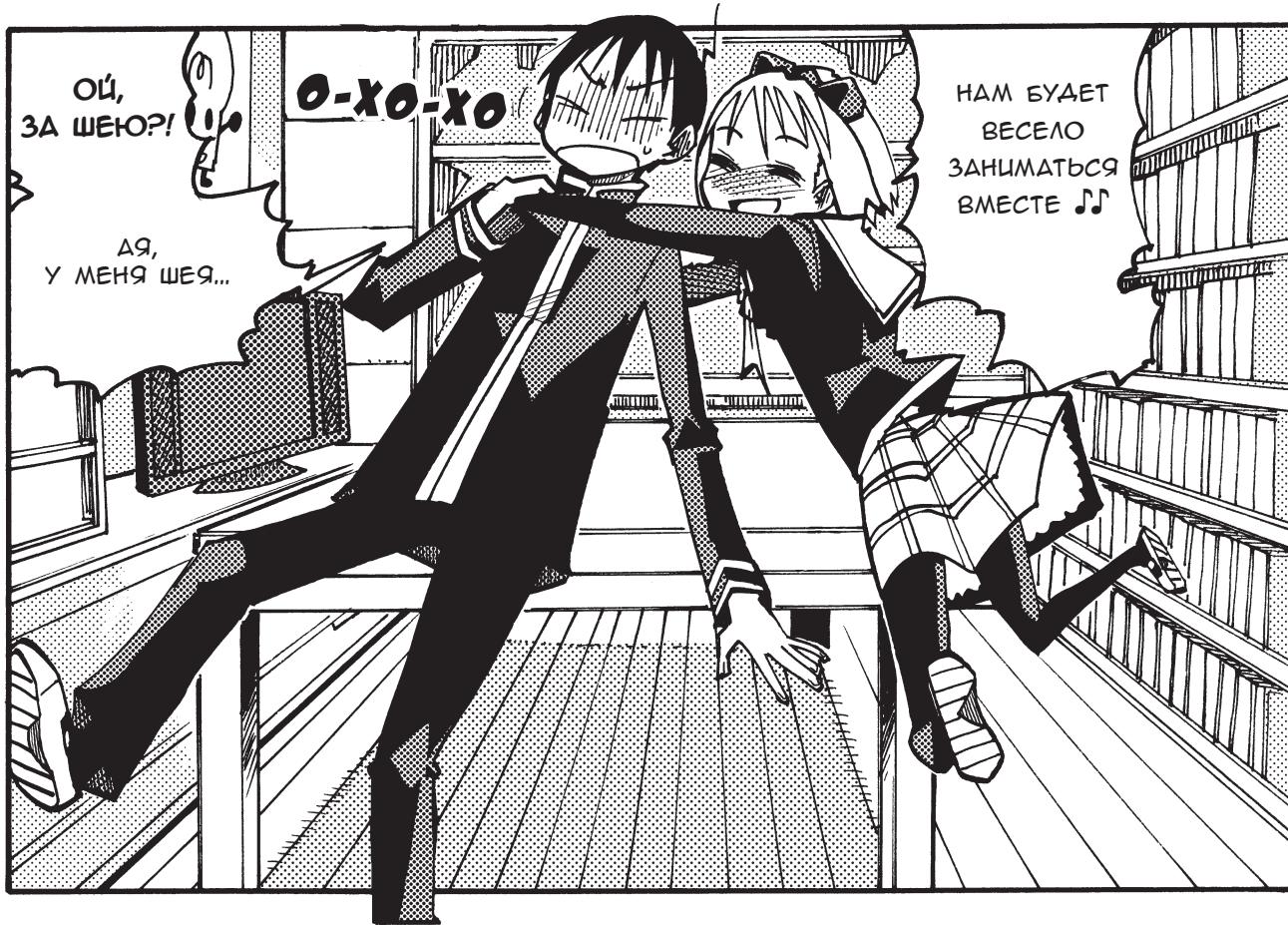
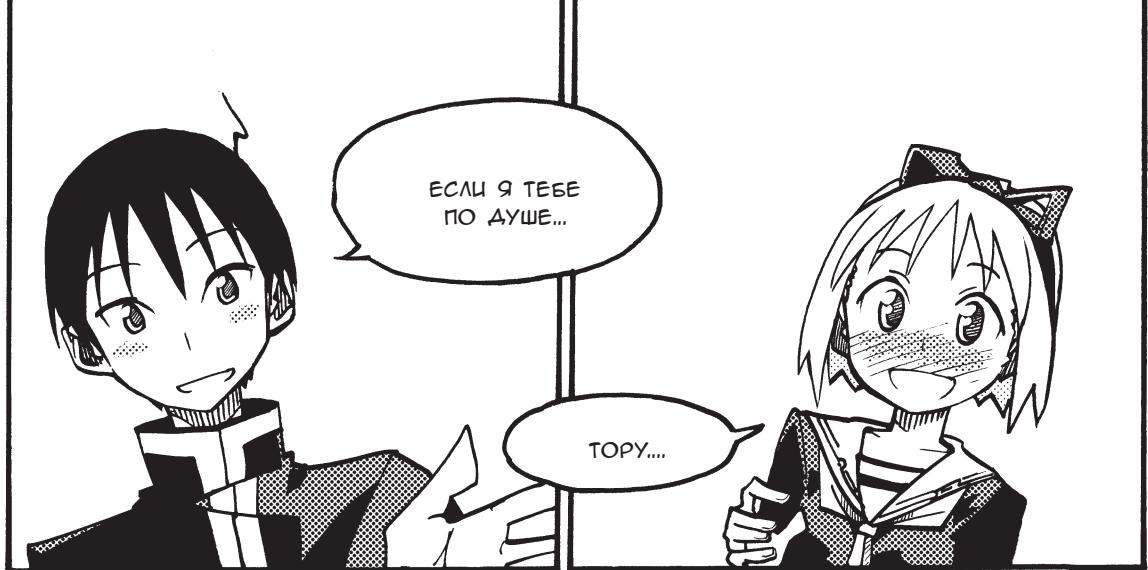
величина K_i , обозначаемая как $|K_i|$, резко уменьшается. Таким образом, на высоких частотах, то есть когда ω сильно увеличивается, возникает такая проблема, как снижение коэффициента усиления по току. Следовательно, так как в резонансном усилителе используются **сигналы высокой частоты**, такие как 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.











ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алюминий 38
Амплитудная модуляция 82, 122
Амплитудно-модулированная волна 84, 102, 111
Анализ цепей 62
Антenna 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
Выход коллектора 149
Выход эмиттера 149
Выплюмление 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
Униполлярные 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, !57
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. Объём 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 ВДОЛЬ 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 АЯ.

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

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ МАНГА



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

Интернет-магазин: www.dmkpress.com

Книга-почтой: orders@aliants-kniga.ru

Оптовая продажа: "Альянс-книга"
(499)782-3889. books@aliants-kniga.ru



www.dmk.rf

ISBN 978-5-97060-353-6



9 785970 603536 >