

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

МАНТА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Иида Ёсикадзу
Ямада Гарэки



OHMsha

ОМК
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Занимательная физика

Электрические цепи

Манга

マンガでわかる

電気回路

飯田 芳一／著

山田 ガレキ／作画

パルスクリエイティブハウス／制作



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

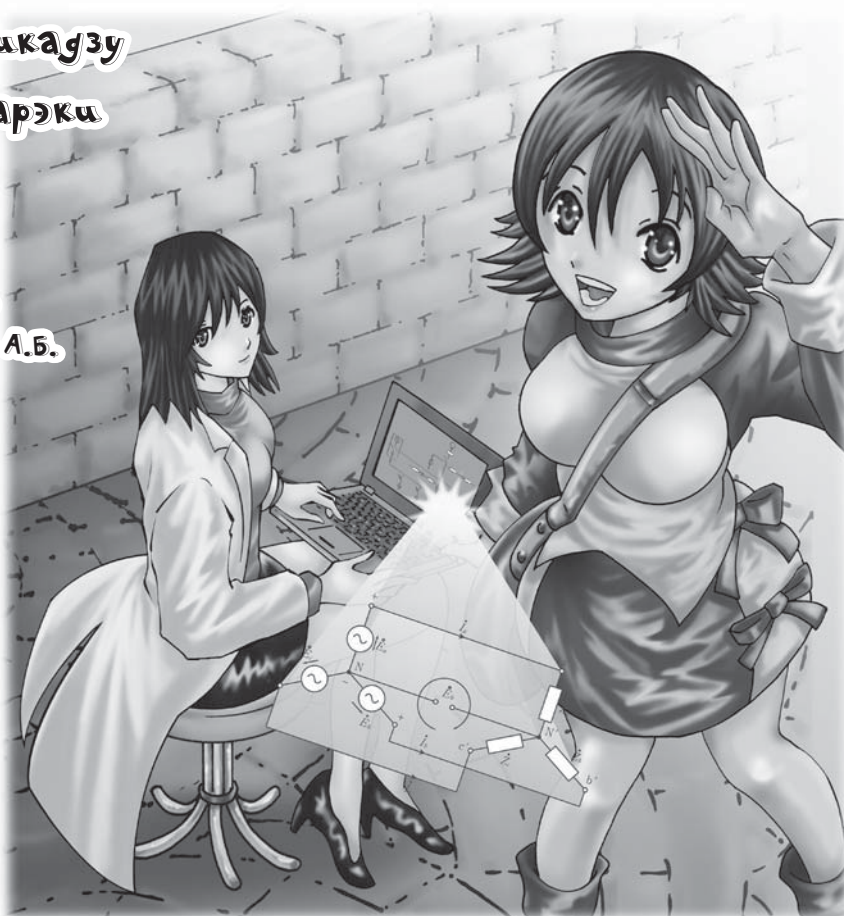
Иига Ёсикагу

Ямага Гарэки

Перевод

с японского

Клионского А.Б.



ДМК
ПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Москва
ДМК Пресс, 2016

УДК 621.3.011.7

ББК 31.211

E83

Ёсикадзу, Иида.

E83 Занимательная физика. Электрические цепи. Манга. / Ёсикадзу Иида (автор), Ямада Гарэки (худож.); пер. с яп. Клионского А. Б. — М. : ДМК Пресс, 2016. — 240 с. : ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп. — ISBN 978-5-97060-163-1.

Эта книга написана с целью дать возможность читателям, приступающим к изучению электрических цепей получить радость от этого процесса. В книге парочка персонажей из параллельного мира - Фьюз и Космо, постепенно узнают много нового, бросая вызов задачам с использованием электрических цепей: от постоянного и переменного тока до генерации и передачи электроэнергии. Автор стремится к тому, чтобы читатели, сопереживая этим героям и испытывая вместе с ними удовольствие от решения задач, тоже не уступали им, а повышали свой уровень мастерства.

Цель книги - заинтересовать школьников, студентов и просто любителей физики изучить теорию электрических цепей. Эти базовые знания дадут толчок к дальнейшему пониманию мира электротехники, умных сетей электроснабжения и космической энергетики.

УДК 621.3.011.7

ББК 31.211

Original Japanese edition

Manga de Wakaru Denki Kairo (Manga Guide: Electric Circuits)

By Yoshikazu Iida (Author), Gareki Yamada (Illustrator) and

Pulse Creative House (Producer)

Published by Ohmsha, Ltd.

3-1 Kanda Nishikicho, Chiyodaku, Tokyo, Japan

Russian language edition copyright © 2016 by DMK Press

Translation rights arranged with Ohmsha, Ltd.

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 978-4-274-06795-2 (яп.) Copyright © 2010 by Shin Takahashi and Pulse Creative House Co., Ltd.

ISBN 978-5-97060-163-1 (рус.)

© Перевод, оформление, издание, ДМК Пресс, 2016



ПРЕДИСЛОВИЕ

Теорию электрических цепей можно назвать первым трудным препятствием, которое преграждает путь начинающим изучение электротехники. Если не научиться разбираться в них, будет очень трудно понять последующие темы — электрогенерацию, электропередачу, электронные схемы и т. д. Однако пытающихся освоить электрические цепи, наверное, часто смущает обилие математических выкладок и формул.

Эта книга написана с целью дать возможность читателям, приступающим к изучению электрических цепей получить радость от этого процесса. В книге парочка персонажей из параллельного мира — Фьюз и Космо, постепенно узнают много нового, бросая вызов задачам с использованием электрических цепей: от постоянного и переменного тока до генерации и передачи электроэнергии. Мне хотелось бы, чтобы читатели, сопереживая этим героям и испытывая вместе с ними удовольствие от решения задач, тоже не уступали им, а повышали свой уровень мастерства.

Как специалист по электротехнике, я буду рад, если как можно больше читателей глубоко поймут теорию электрических цепей и ещё сильнее заинтересуются ей. А затем, превзойдя это первое препятствие, попытаются войти в мир электротехники, умных сетей электроснабжения и космической энергетики.

В заключение хочу здесь выразить искреннюю благодарность г-ну Ямада Гарэки, нарисовавшему мангу, сотрудникам компании Pulse Creative House, а также всем сотрудникам и заинтересованным лицам отдела разработок издательства Ohmsha, давшим мне возможность написать эту книгу.

*Иида Ёсикадзу
Февраль 2010*



СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО?

1. Природа электричества	10
Атомное ядро и электроны.....	19
Электростатическая индукция.....	19
2. Проявления электричества	21

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Последовательная цепь.....	28
Схема соединений (монтажная) и принципиальная схема.....	39
2. Параллельная цепь	40
3. Закон Ома	41
Основа основ - «закон Ома»	41
Принципиальная схема и её расчёт	42



Лекция 1 мастера Ёта. Общее сопротивление	43
--	----

4. Эквивалентные схемы.....	56
-----------------------------	----



Лекция 2 мастера Ёта. Расчёт эквивалентных схем	58
--	----

5. Правила Кирхгофа	60
Фундамент теории электрических цепей.....	60
Дополнительная информация	73
Электрическая энергия (электроэнергия)	73
Электрическая проводимость.....	73
Мост Уитстона	73
Теорема наложения	74

Глава 3. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Электромагнитная индукция.....	76
2. Синусоидальный переменный ток	81



3. Среднее и действующее значения тока	83
Смысл действующего значения.....	93
Расчёт действующего значения	94
Определение действующего значения.....	94
 Лекция 3 мастера Ёта. О векторах и комплексных числах.....	100
4. Полное сопротивление и полная проводимость	101
Индуктивность.....	113
Индуктивное сопротивление.....	115
Электрическая ёмкость	117
Ёмкостное сопротивление	118
5. Векторы и разность фаз.....	121
6. Мощность переменного тока	135
Как выразить мощность переменного тока?.....	145
Связь между мощностью, полным сопротивлением и коэффициентом мощности	148
Векторное выражение мощности	149
 Лекция 4 мастера Ёта. Мощность переменного тока	151
Дополнительная информация	157
Резонансные цепи.....	157
Теорема об активном двухполюснике (теорема Тевенена-Гельмгольца*)	157

Глава 4. ЦЕПИ ТРЁХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Выгоды трёхфазного переменного тока	162
Причина использования трёхфазного переменного тока	164
2. Подключение трёхфазного переменного тока	165
Звёзды и многоугольники	165
3. Изучаем трёхфазный переменный ток с помощью векторов.....	166
Оператор поворота.....	166
Почему проводов три?.....	167
4. Трёхфазный переменный ток при соединении фаз звездой и треугольником	168
Соединение фаз «звездой» и «треугольником».....	168
Соединения «звезда-звезда» и «звезда-треугольник»	169



Очень просто! Соединение фаз источника «треугольником» 179

5. Мощность трёхфазного тока 181



Лекция 5 мастера Хиудзу. Трёхфазный переменный ток 188

Дополнительная информация 194

Вращающееся магнитное поле 194

Инвертор 196

Глава 5. ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА



Лекция 6 мастера Ёта. Электрогенерация и электропередача 202

Дополнительная информация 209

Умные сети электроснабжения 209

Технология передачи электроэнергии на сверхвысоких частотах .. 210

Технология сверхпроводимости 210

Системы космической солнечной электрогенерации 211

Электрогенерация термоядерного синтеза 212

Топливные элементы 213

Солнечная электрогенерация 213

Ветровая электрогенерация 214

Тепловой насос 215

Светодиодное освещение 215

Интернет по линиям электропередач 215

Основные понятия 217



Лекция 7 мастера Ёта. Термины теории электрических цепей 217

Основные понятия 217

Практические термины 218

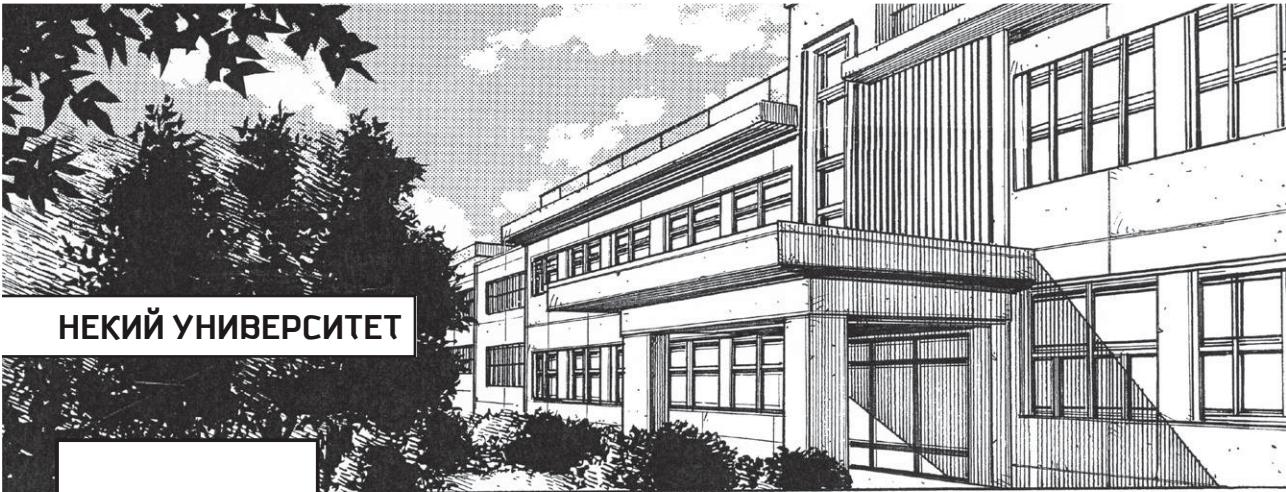
Символы греческого алфавита 219

Единицы измерения, используемые для электрических цепей .. 220

Обозначения, используемые на электрических схемах 221

Эпилог 223

Предметный указатель 228



НЕКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЛАБОРАТОРИЯ

ИТАК, ЕСЛИ УДАСТСЯ
ПОЙМАТЬ ЭТУ ЧАСТИЦУ,

ТО НАЧНЁТСЯ ЭПОХА
НОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.

Профессор
электротехники
Масуда Ёта

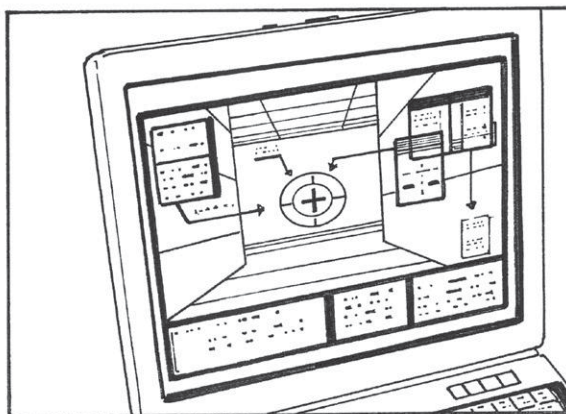
МОЖЕТ БЫТЬ,
Я ТОЖЕ СМОГУ СТАТЬ
ЗНАМЕНИТОСТЬЮ?
И СОЗДАННАЯ МНОЙ
ИГРА БУДЕТ ХОРОШО
ПРОДАВАТЬСЯ?

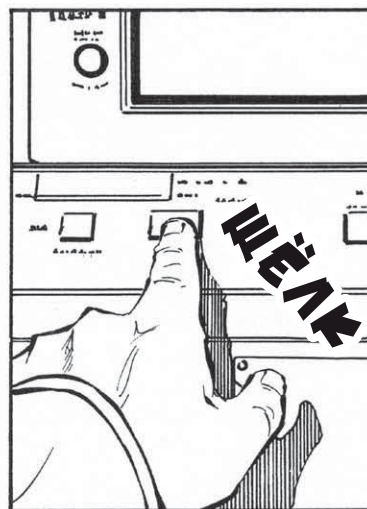
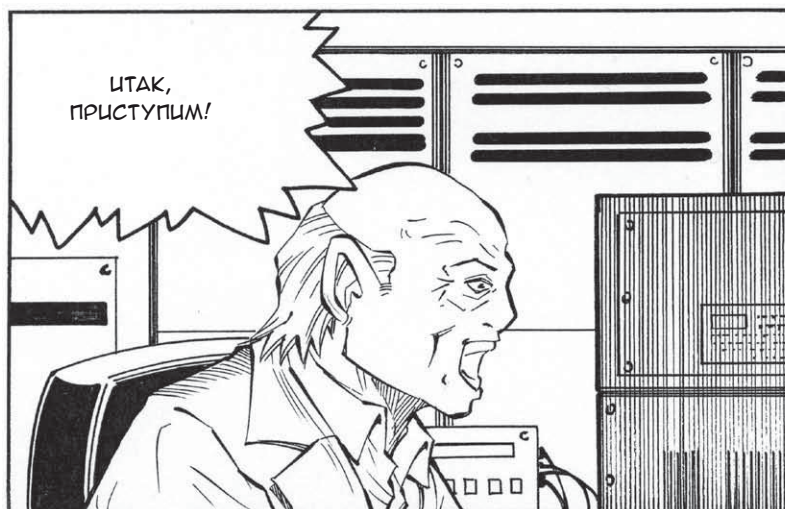
САЙКО, СДЕЛАЙ ТАК,
ЧТОБЫ ДАННЫЕ
СКАЧИВАЛИСЬ
НА МОЙ КОМПЬЮТЕР
ТОЖЕ.

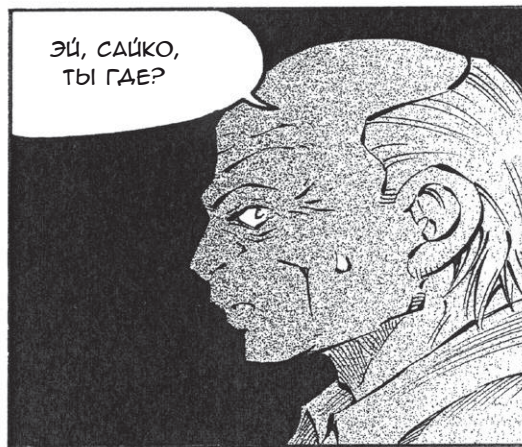
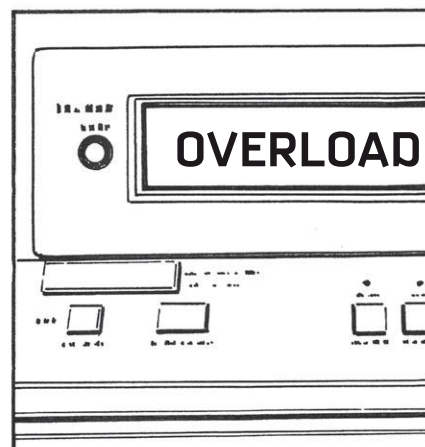
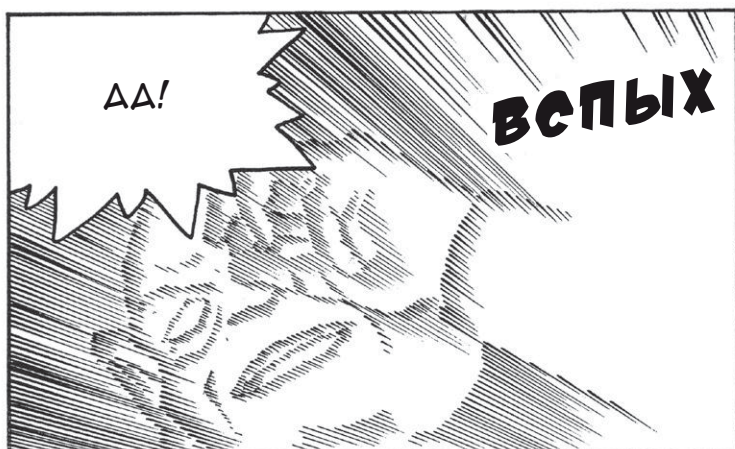
ПОНЯЛА.

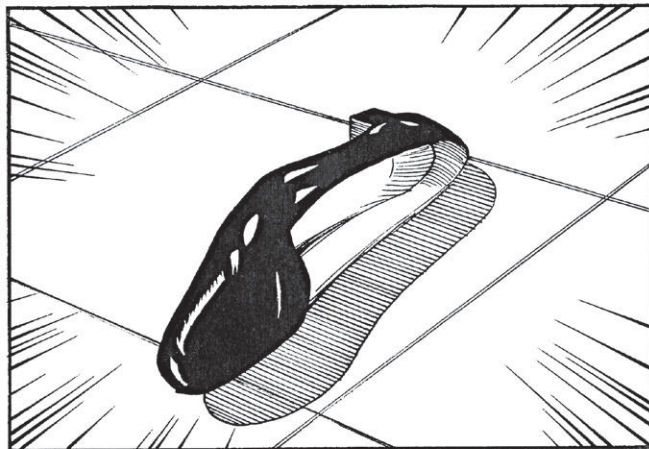
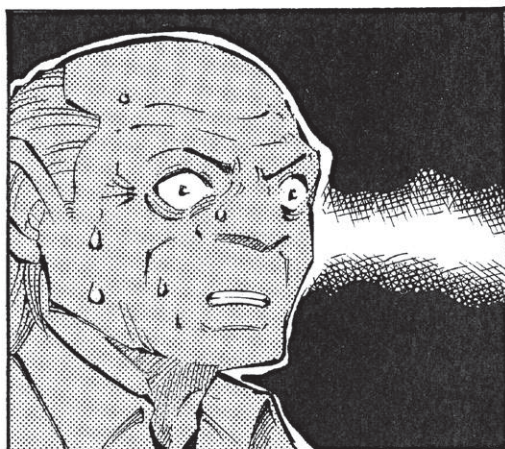
Профессор
электротехники
Масуда Сайко

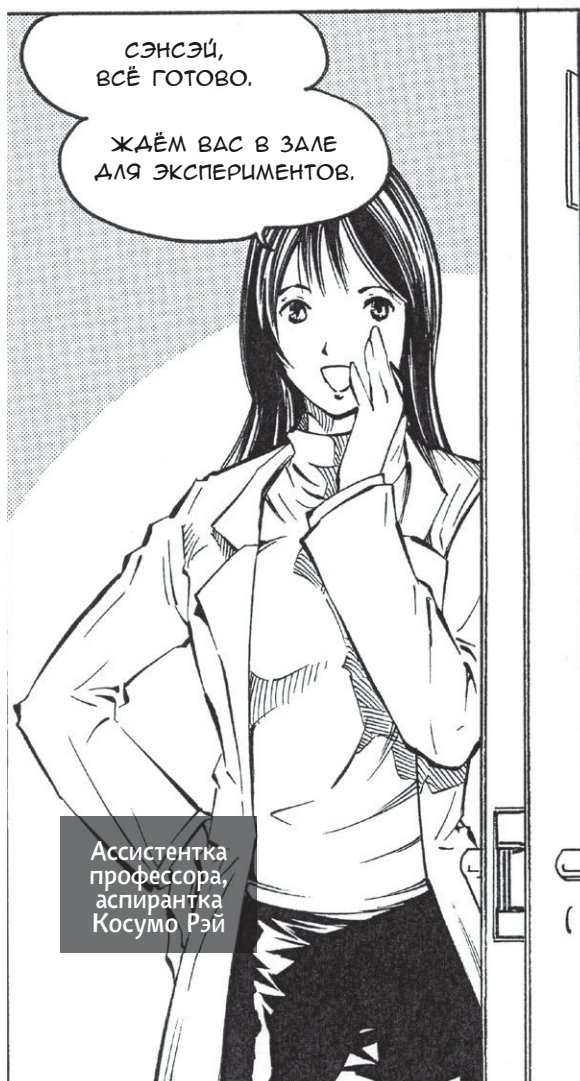
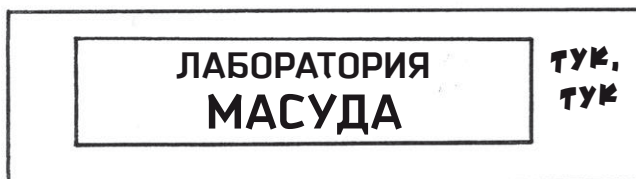
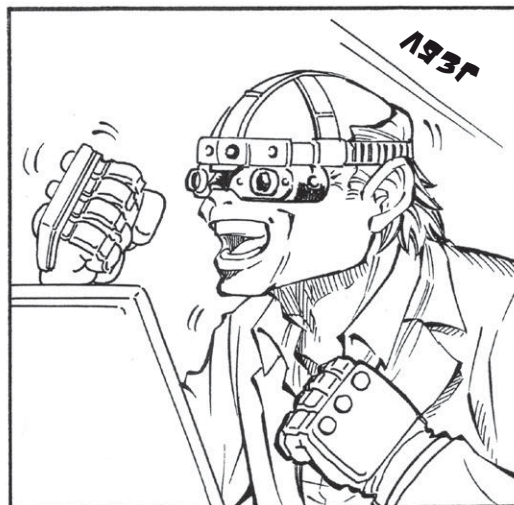
ВСЁ ГОТОВО.

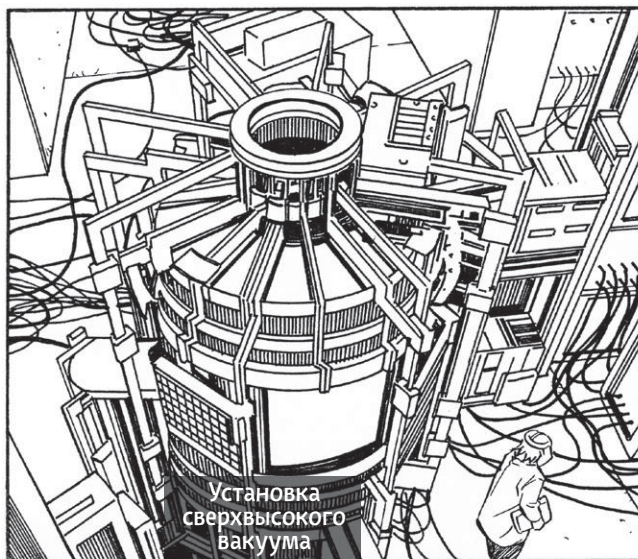


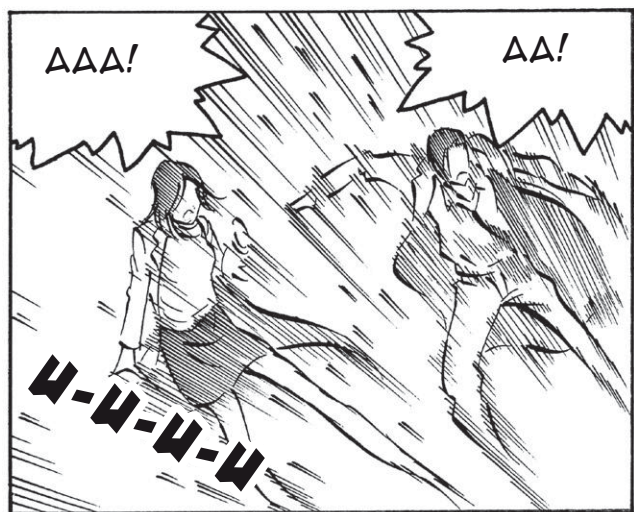


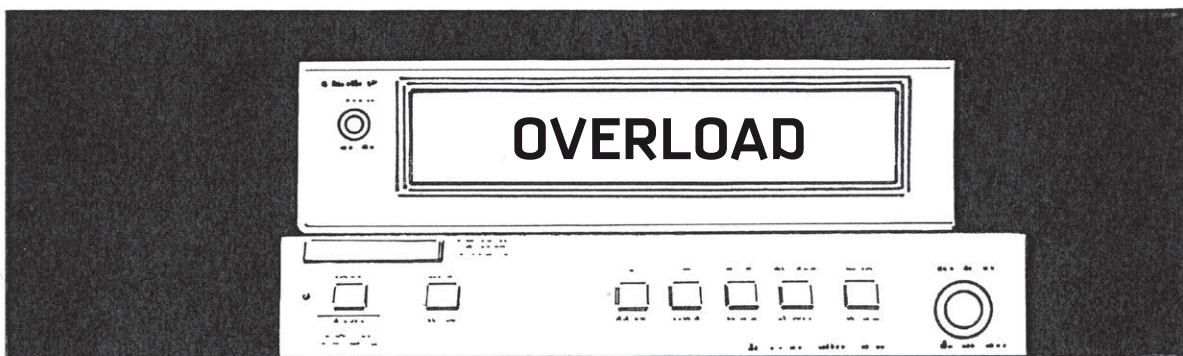
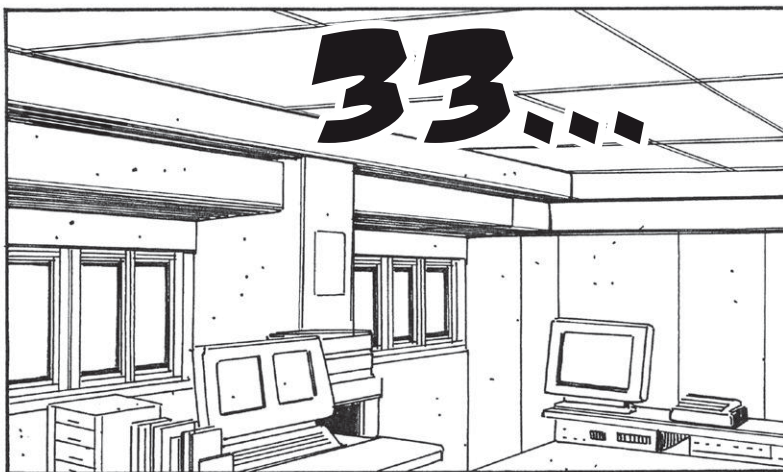
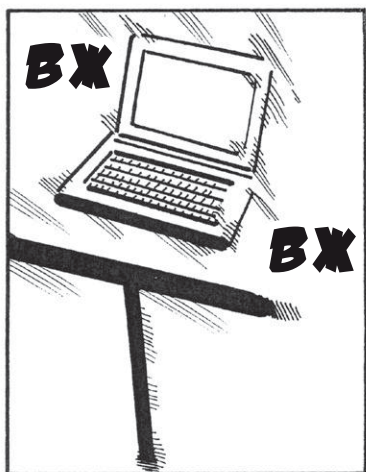
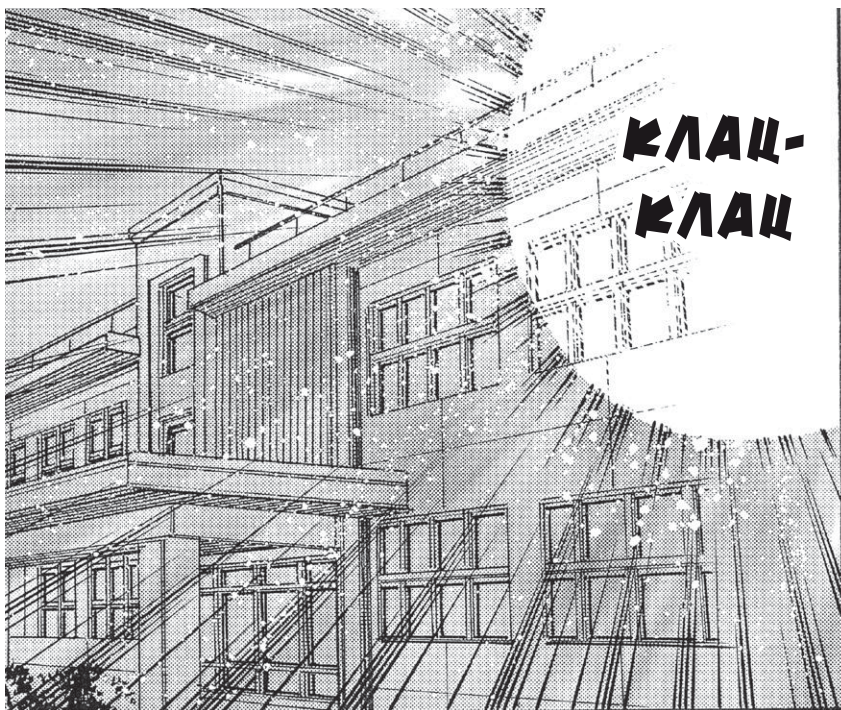












ГЛАВА 1

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО?



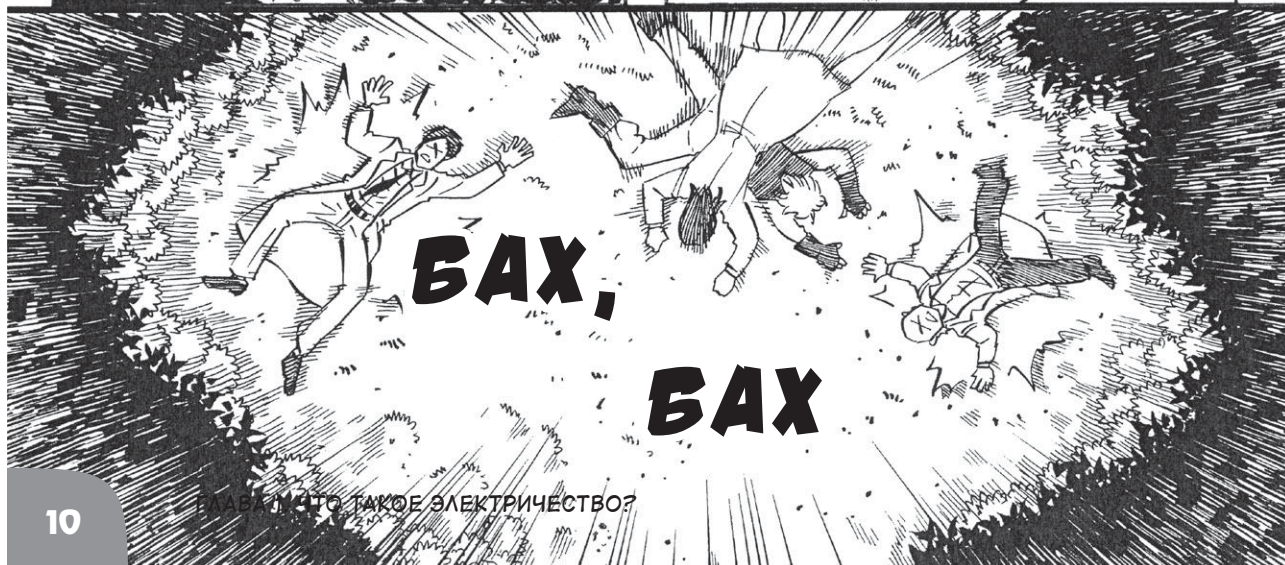
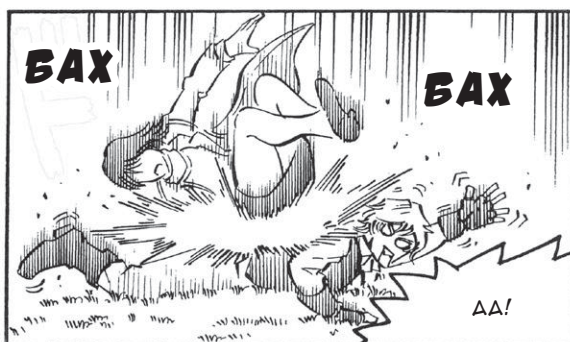
1. ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

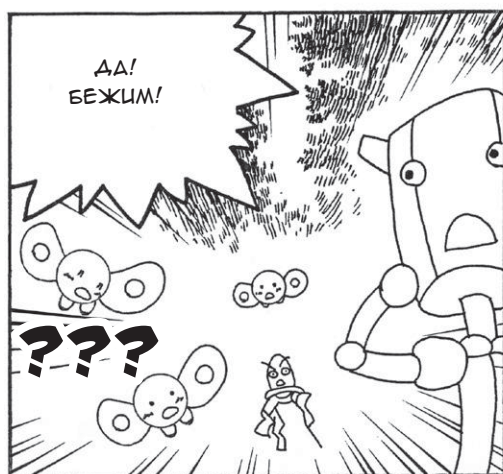
И-И-И

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ МИР

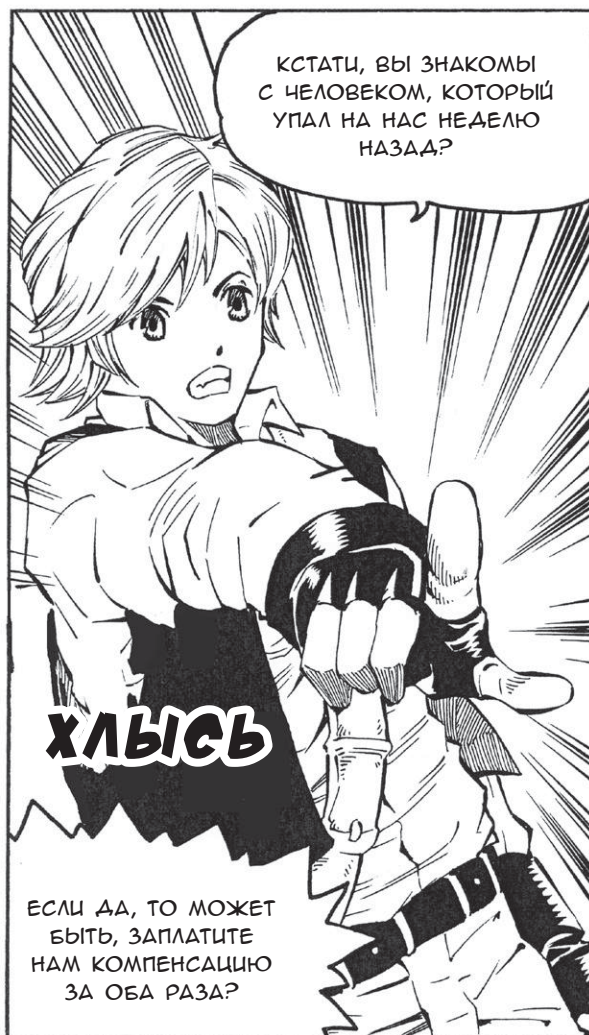


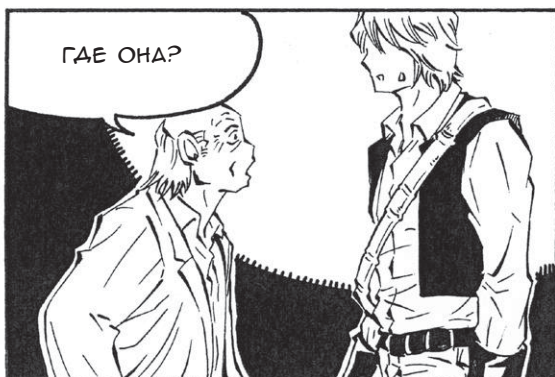
ФЫОЗ –
ДВОЙНИК ХИУДЗУ
В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ
МИРЕ







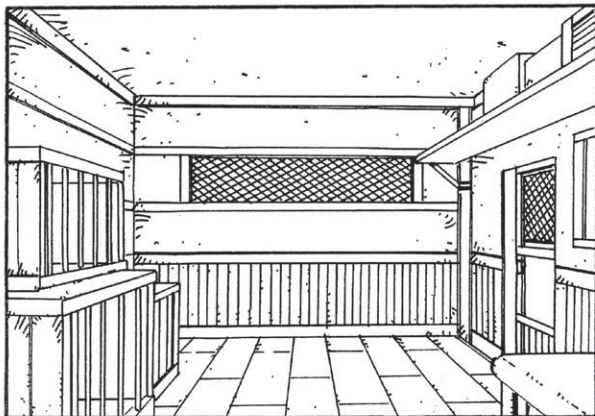












■ АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕКТРОНЫ



Знаешь ли ты, что электрический ток — это поток свободных электронов?

Все вещества, ну, в нашем данном случае мы будем говорить о металлах (о меди, о железе), состоят из атомов. Знаешь ли ты об их строении?



Ах, конечно знаю. Атомное ядро и электроны.



Да. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, протоны обладают положительным зарядом.



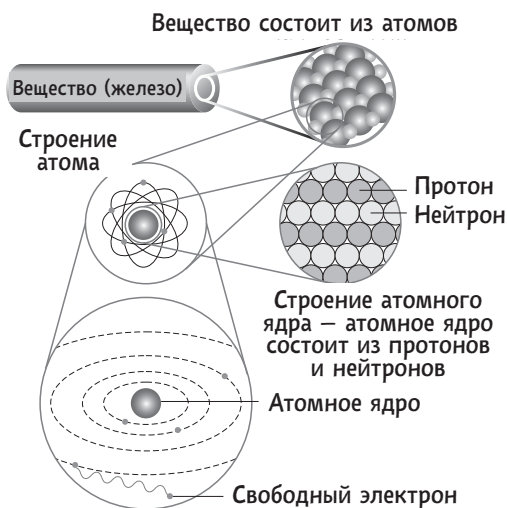
А вокруг атомного ядра вращаются электроны, так?



Да. Те из них, которые вращаются дальше всего от ядер, легко могут покинуть атомы и стать свободными электронами. Направленное движение свободных электронов называют электрическим током.



Я же сказал, что всё это знаю.



■ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ



Не сердись. В любом деле важна основа, поэтому потерпи немного. Вот тут, кстати, есть эбонитовая пластина. А вот — лоскут шерсти. Если потереть шерстью эбонит, то они наэлектризуются. Этот механизм электростатической индукции лежит в основе действия конденсатора.



Я же сказал, что знаю это!



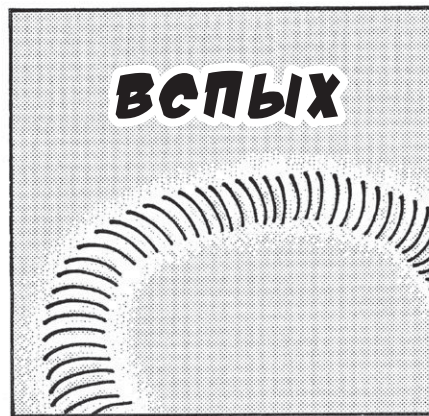
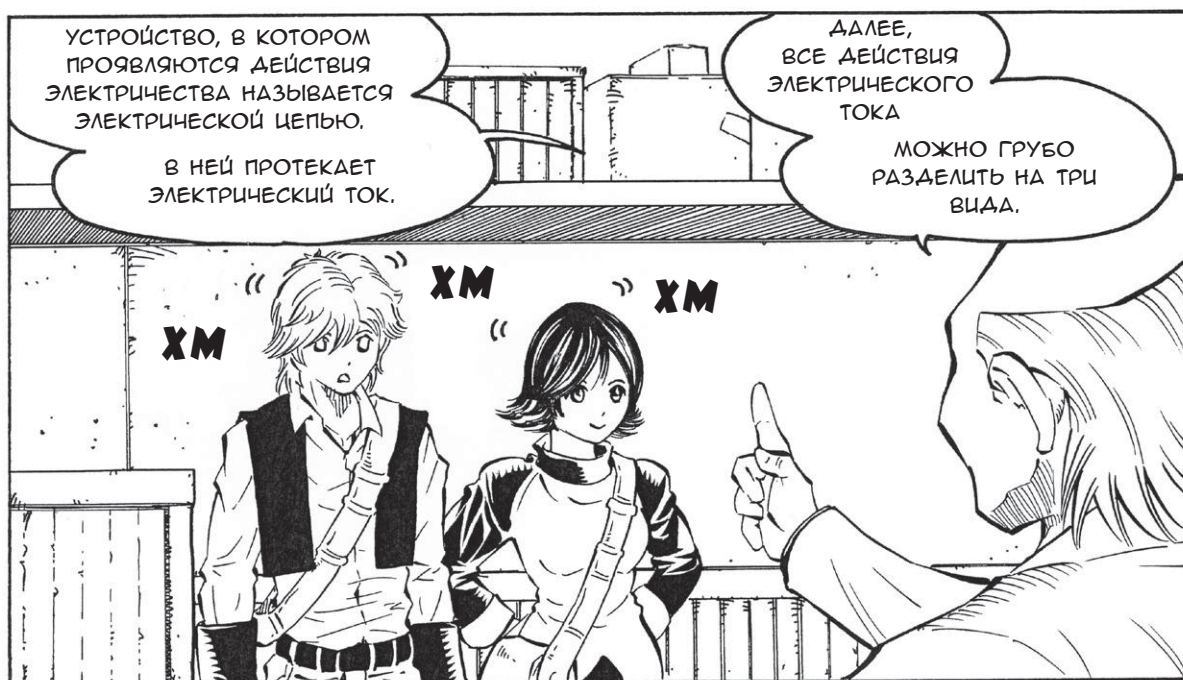
Правда? А вот я в первый раз слышу. Это объяснение ведь не только для тебя, но и для меня.



Если положить кусок металла на отрицательно заряженный эбонит, то ближняя к эбониту сторона металла зарядится положительно, а противоположная сторона — отрицательно.

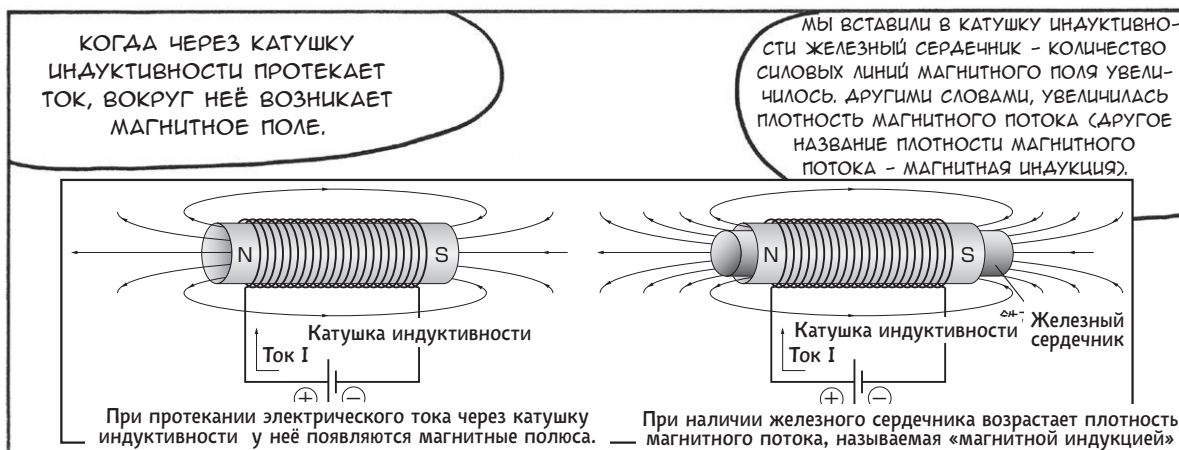


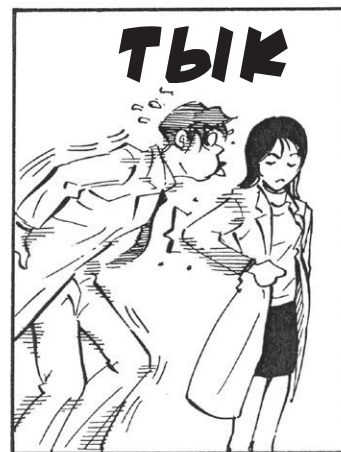
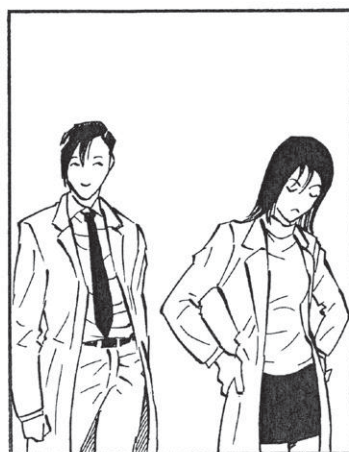
2. ПРОЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

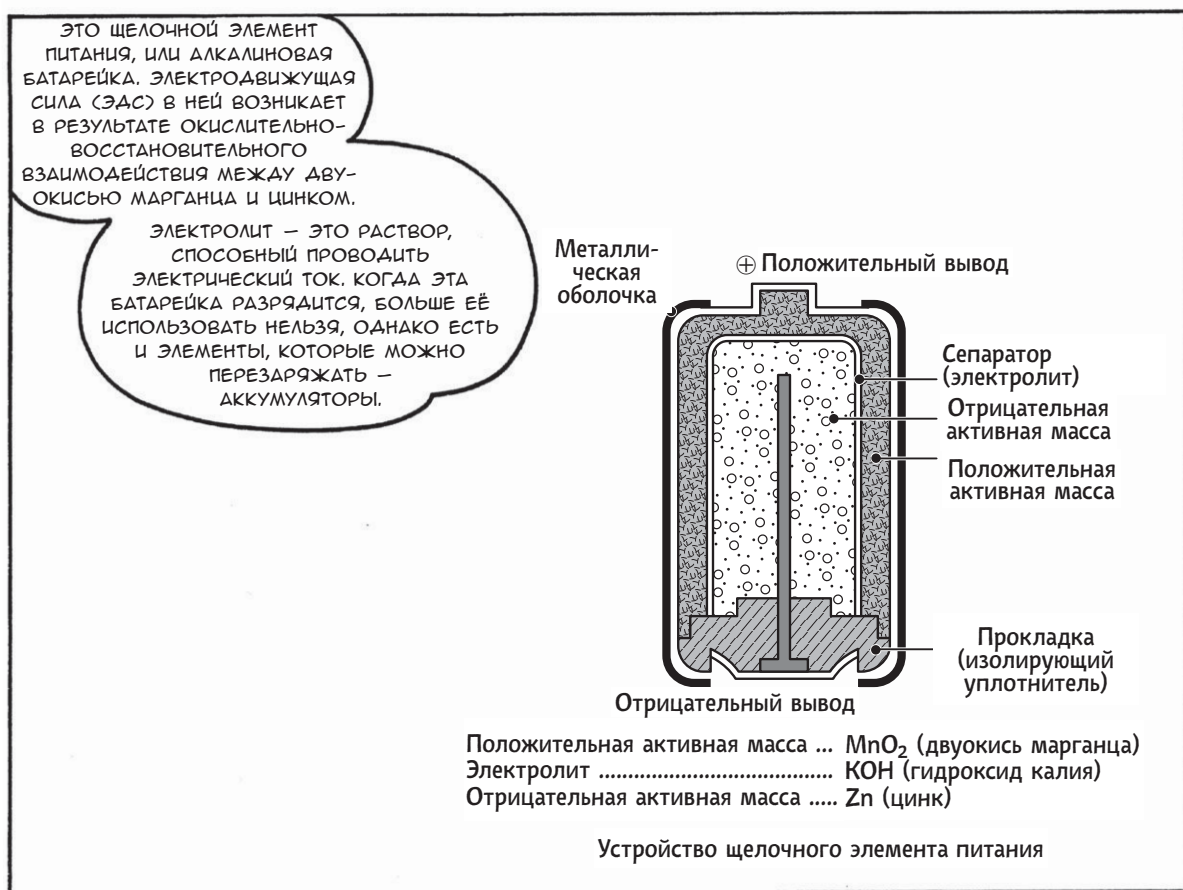
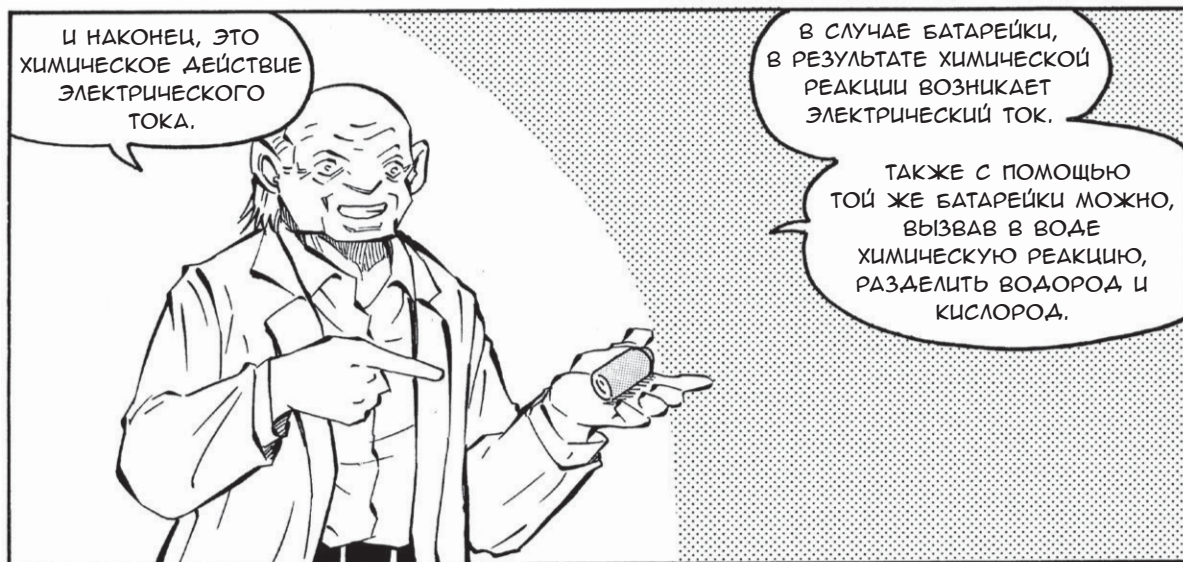




* Традиционная обогревательная печь с одеялом, используемая в японских домах в зимний период, ввиду отсутствия в Японии центрального водяного отопления (прим. перев.)

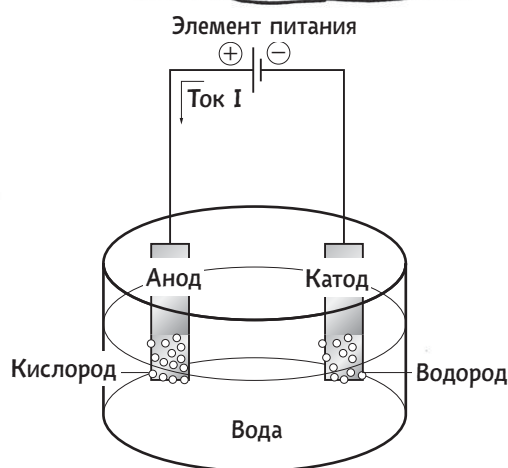




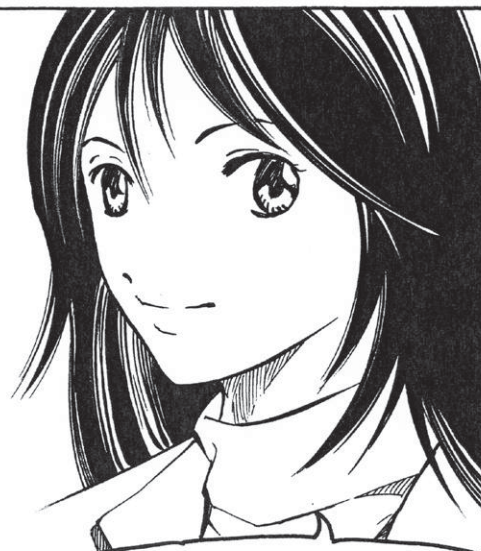


А ЭТО - ЭЛЕКТРОЛИЗ
ВОДЫ.

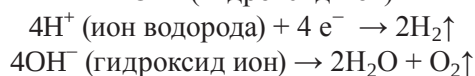
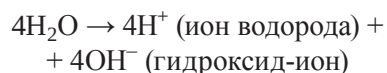
ОН ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ТОМ, ЧТО ПРИ
ПРОХОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА
ЧЕРЕЗ ВОДУ В НЕЙ ПРОИСХОДИТ
ИОНИЗАЦИЯ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА.
ПРИ ЭТОМ ВОДОРОД ТЕРЯЕТ ЭЛЕКТРОН,
СТАНОВЯСЬ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ИОНОМ, А
КИСЛОРОД СТАНОВИТСЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ
ИОНОМ В ВИДЕ OH^- .



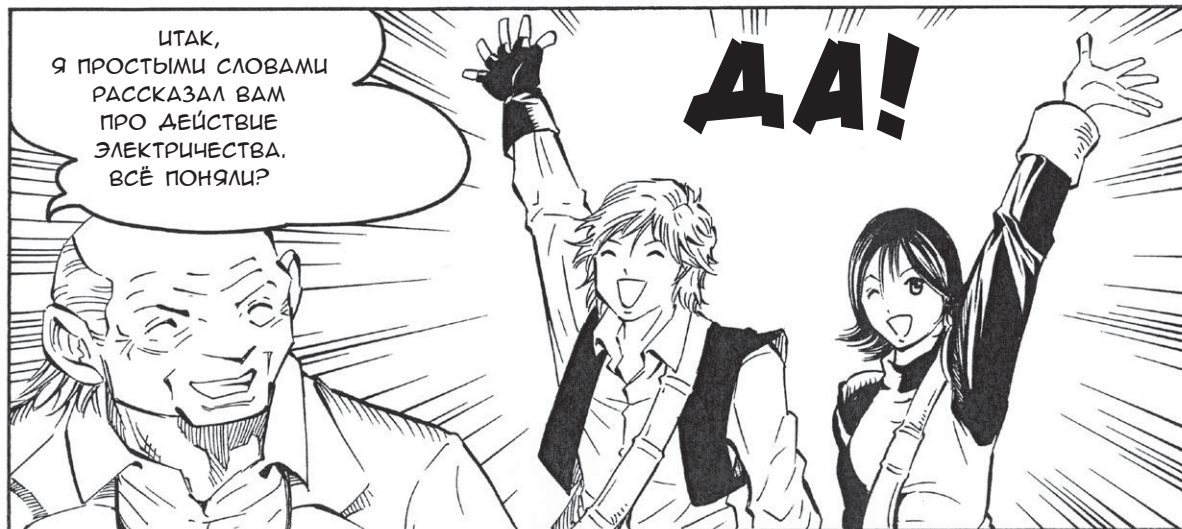
На положительном электроде
выделяется кислород,
а на отрицательном — водород.

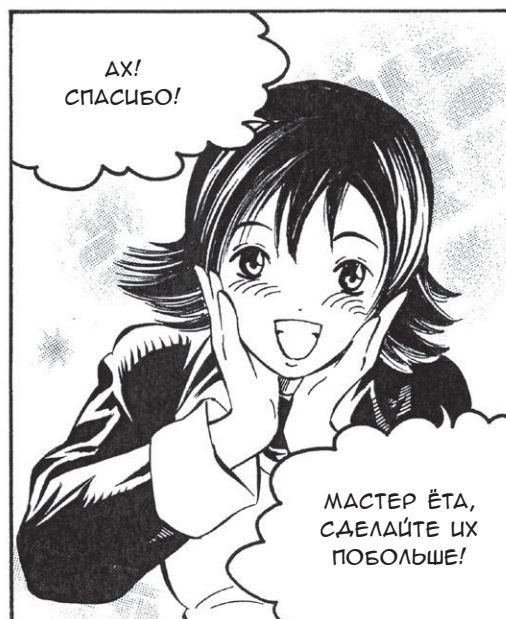


ПРИ ЭТОМ ВОДА ПРЕТЕРПЕВАЕТ
ПРЕВРАЩЕНИЯ, ОПИСЫВАЕМЫЕ
СЛЕДУЮЩИМИ ХИМИЧЕСКИМИ
ФОРМУЛАМИ



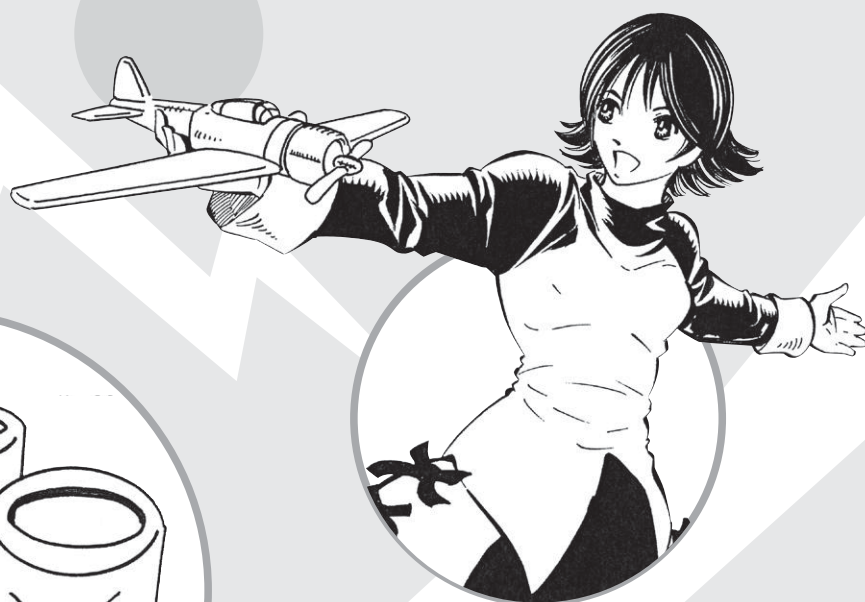
ИТАК,
Я ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ
РАССКАЗАЛ ВАМ
ПРО ДЕЙСТВИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.
ВСЁ ПОНЯЛИ?





ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

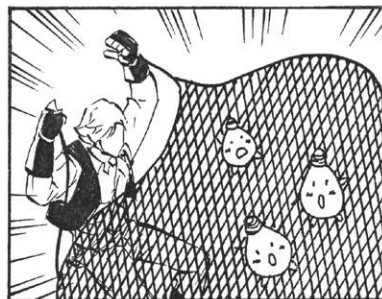
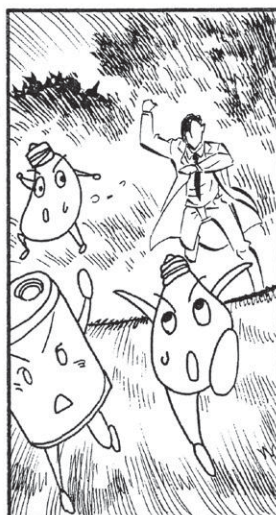


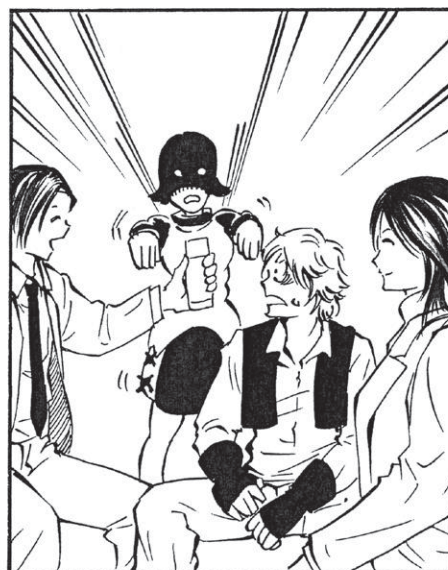
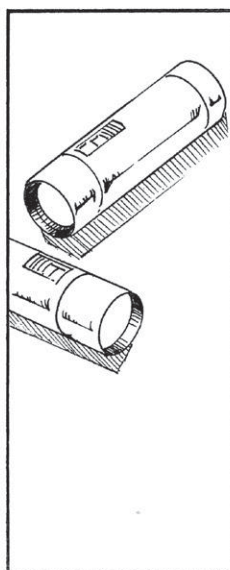
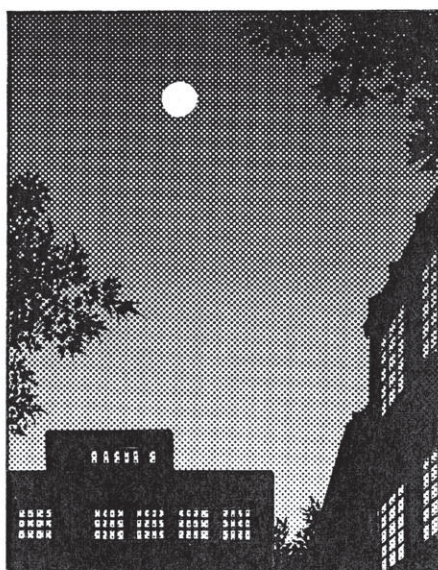
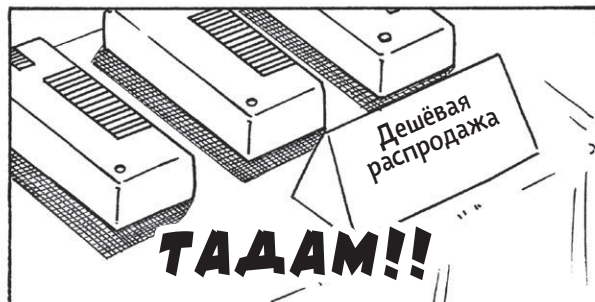


1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

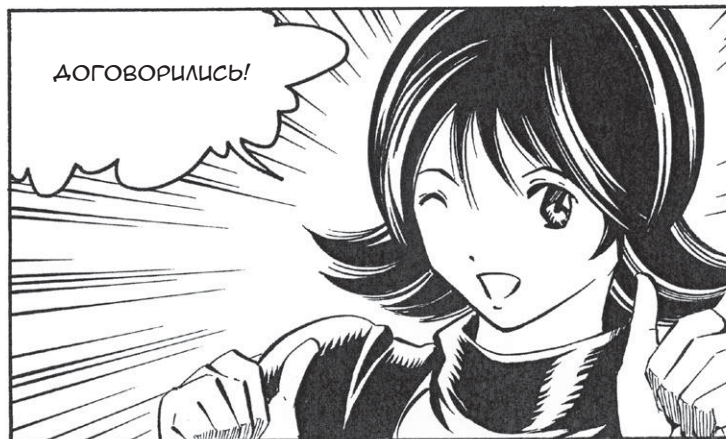


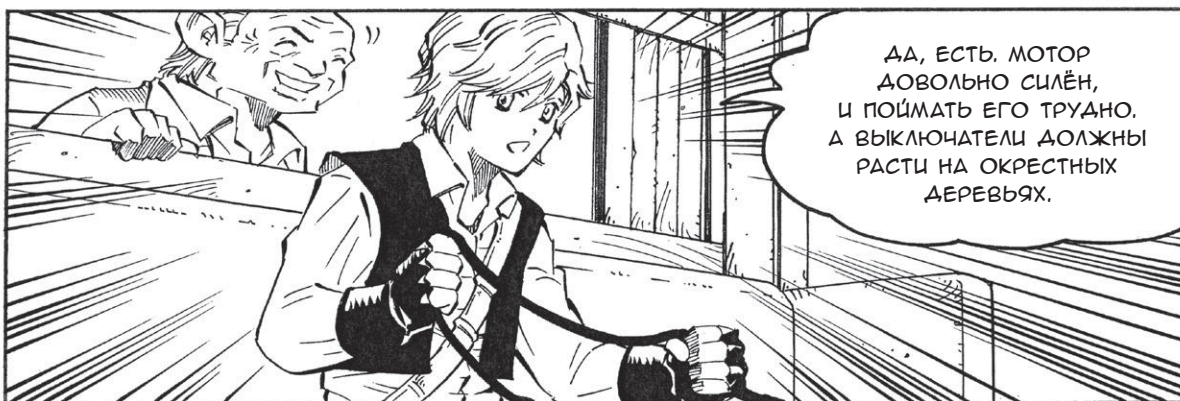
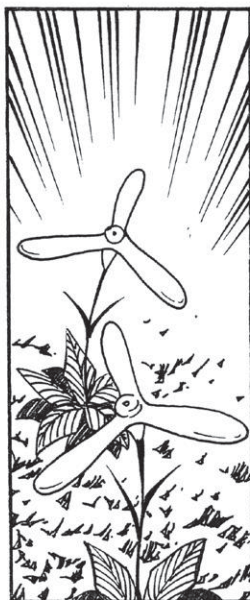


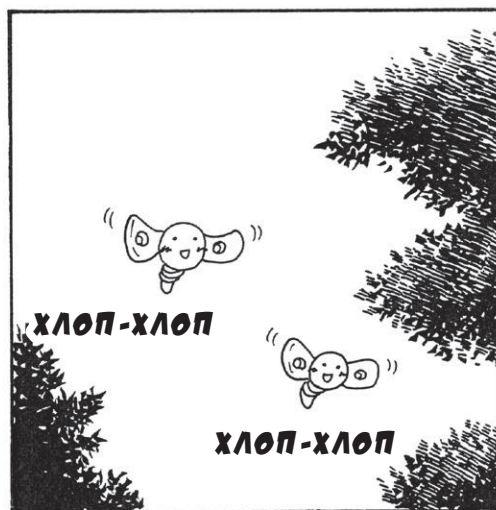




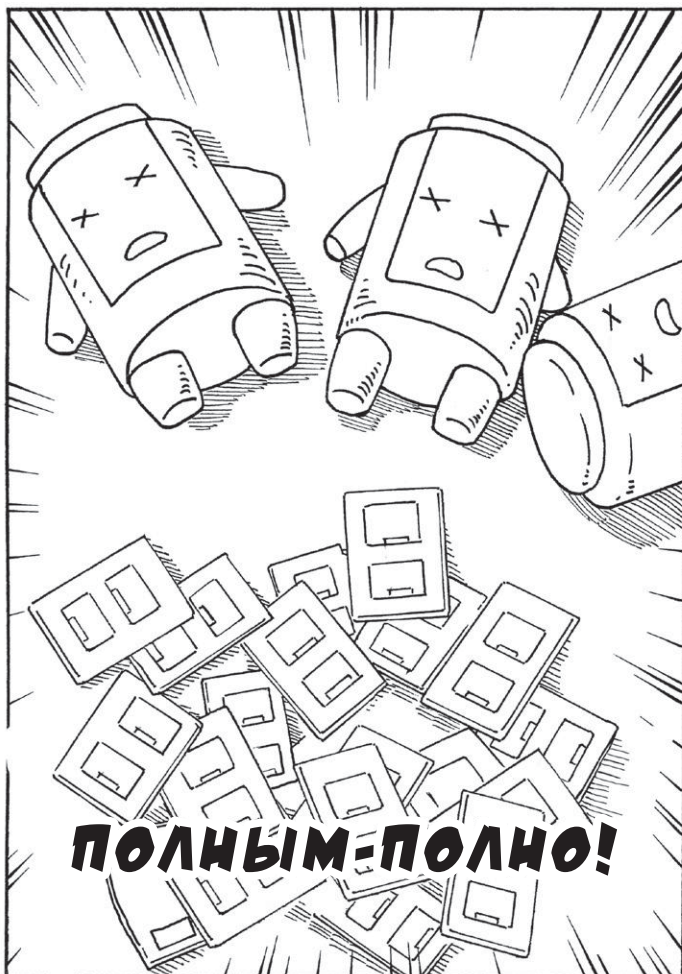


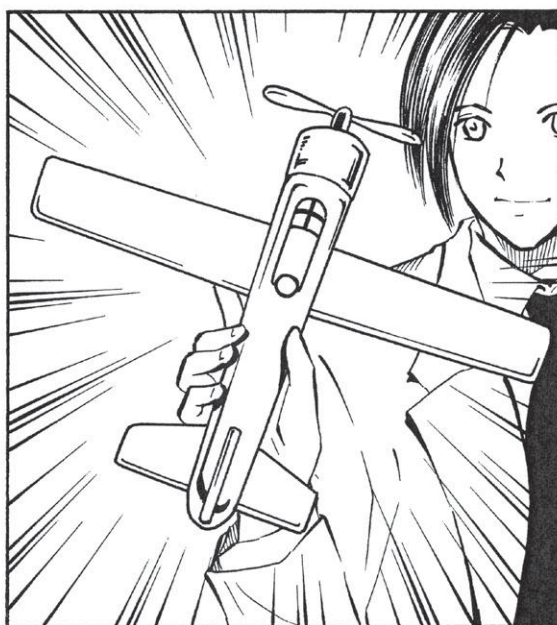
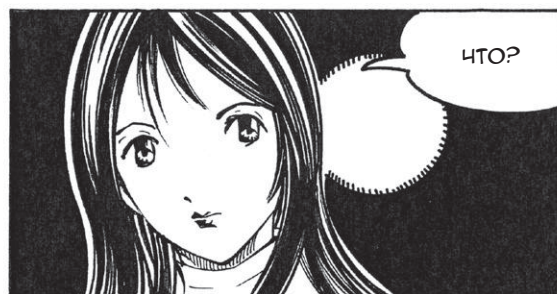
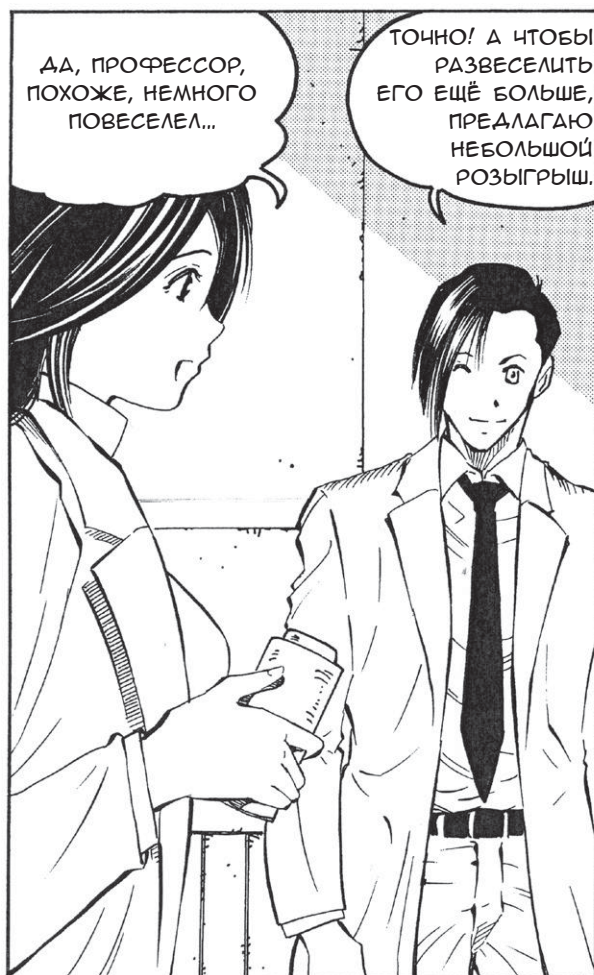










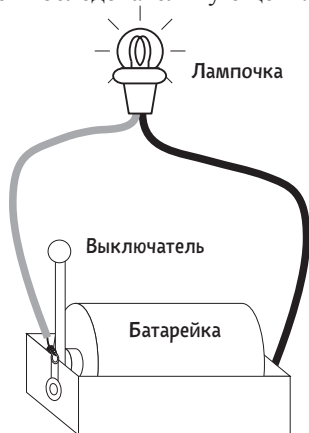


■ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ (МОНТАЖНАЯ) И ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА



На этих рисунках с помощью монтажной и принципиальной схем показано устройство, позволяющее зажигать лампочку. Совокупность устройств и элементов, по которым протекает электрический ток, называют электрической цепью, или просто цепью.

Батарейку называют источником. Элементы цепи, в которых происходит преобразование электрической энергии в другие виды, подобно лампочке, в которой электрическая энергия преобразуется в свет, называют приёмниками, или нагрузками. Элементы, с помощью которых контролируют ток, например, выключатели, называют устройствами управления. Наконец, маршрут, по которому соединяют воедино все вышеперечисленные части, называют электрической проводкой. В последовательной цепи только один контур, поэтому она проста. Такую цепь имеют карманные фонарики, которые я собирал. Вентилятор, который изготавливают сейчас, тоже в своей основе имеет последовательную цепь.



Монтажная схема подключения лампочки к батарейке



Принципиальная схема

Теперь давайте подключим к этой цепи ещё одну лампочку

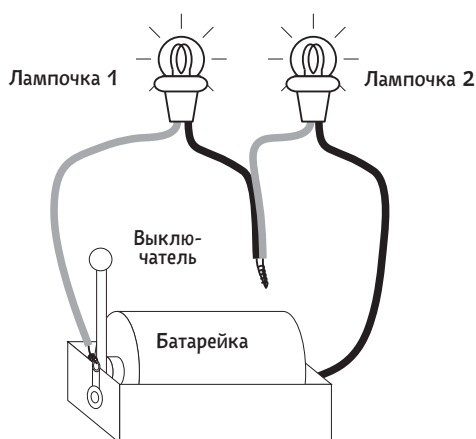


Схема последовательного подключения двух лампочек к батарейке



Принципиальная схема



Ой! Лампочки светятся слабее!

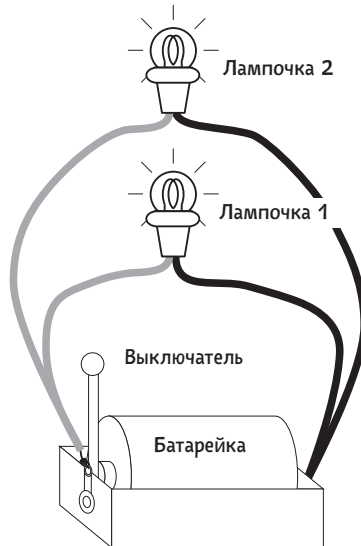
А я знаю, в чём тут дело! При последовательном соединении двух лампочек электрический ток I становится меньше.

Хорошо. Потом объяснишь Космо причину этого.

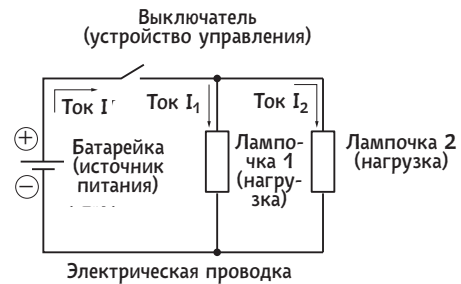
2. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ



Давай теперь немного изменим эту цепь



Монтажная схема параллельного подключения двух лампочек к батарее



Принципиальная схема



Лампочки опять горят ярко!



Да. Этот метод подключения называют параллельной цепью. В этой цепи есть два контура электрического тока. Фьюз, можешь объяснить Космо и это тоже?



Конечно! Подробно я объясню позже, но, в общем, при параллельном подключении увеличится ток I батарейки.

3. ЗАКОН ОМА

■ ОСНОВА ОСНОВ – «ЗАКОН ОМА»



Слушаешь меня, Космо? Между напряжением, током и сопротивлением действует определённое соотношение, называемое «законом Ома». То есть, это означает: «Ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению».

В виде формул это записывается так:

$$E = IR$$

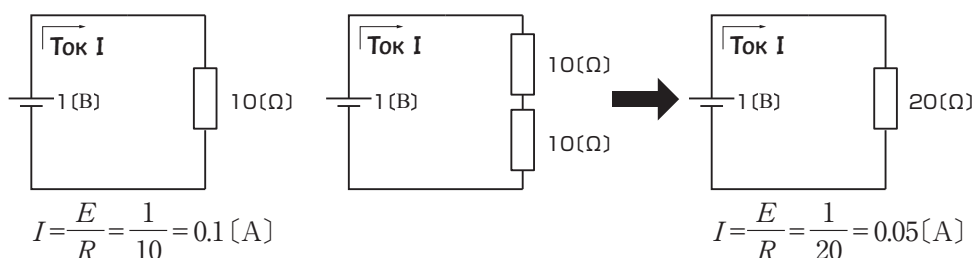
$$I = E/R$$

$$R = E/I$$

Это и есть «закон Ома». Поэтому если принять, что в нашей последовательной цепи действует напряжение 1 В, а сопротивление лампочки равно 10 Ом, то можно вычислить ток по формуле:

$$I = E/R, \text{ то есть получится } 1/10 = 0,1 \text{ А}$$

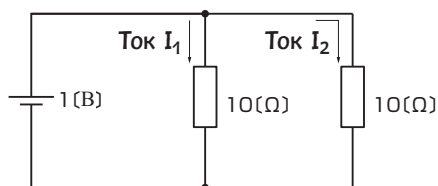
Потом мы создали цепь с последовательным соединением двух лампочек. При её расчёте нужно рассматривать две лампочки как одно сопротивление, равное 20 Ом. Поэтому получится следующее:



Ток уменьшился в два раза, не так ли? Именно поэтому свет лампочек ослаб.



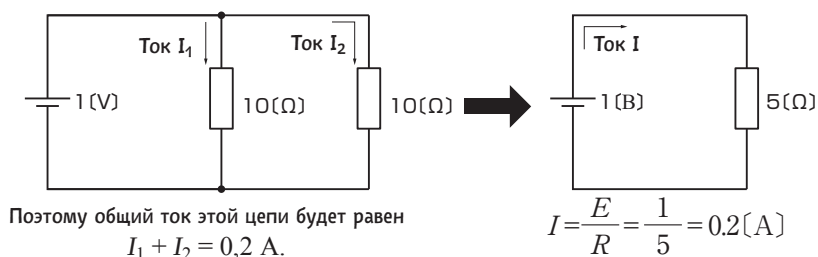
А что насчёт этой параллельной цепи?



■ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА И ЕЁ РАСЧЁТ



В этом случае у тока есть два пути I_1 и I_2 , однако, так как напряжение и сопротивление для них одинаковы, токи I_1 и I_2 будут равны друг другу по 0.1 А.



Так как $R = E/I$, общее сопротивление цепи будет равно 5 Ом:

$$1 / 0,2 = 5 \text{ Ом}$$

Ну как, дядя?



Не говори «дядя»! Я – мастер Ёта! Ну ладно, ты объяснил хорошо. Вы оба хорошо понимаете. Фьюз – уровень три, Космо – уровень два.



Дядя... Ой, извините, мастер Ёта, что значат эти ваши «уровни два, три»?



Не обращай внимания. Это ваши «уровни силы» в моей голове.



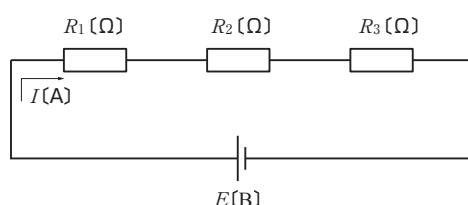
ЛЕКЦИЯ МАСТЕРА ЁТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ СИЛЫ (1)

ОБЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ



Да, Фьюз, молодец. Теперь мы немного поупражняемся. Рассчитайте-ка общее сопротивление следующей цепи.

Пример 1



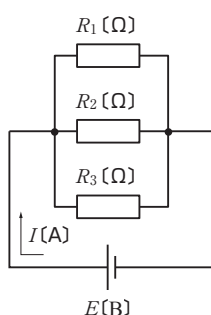
Это так просто! И мы получим общее сопротивление

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$



Ага. Правильно. А теперь вот этой.

Пример 2



Ой, что это?

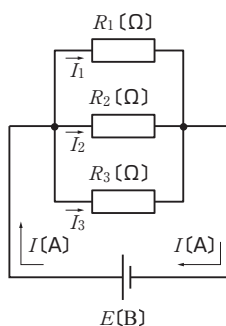


Значит, если сопротивлений три штуки, то мы в тупике?



Подожди немного! Я подумаю!

Напряжение и входящий ток одинаковые, исходящий ток тоже одинаковый...



Ты имеешь в виду это? Если по-твоему, то получится вот так:

$$E = R_1 I_1 = R_2 I_2 = R_3 I_3$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$



Понятно. Если обозначить общее сопротивление R_0 , то по закону Ома

$$I = E / R_0,$$

получается следующее:

$$I_1 = E/R_1, \quad I_2 = E/R_2, \quad I_3 = E/R_3, \quad I = E/R_1 + E/R_2 + E/R_3$$



Если в последней формуле вынести E за скобки, то у нас получится вот что!

$$I = E(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$$



А если переписать это, то получится вот это, не так ли?

$$I = E/R_0 \rightarrow 1/R_0 = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$



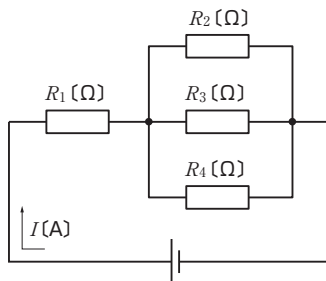
$$R_0 = (R_1 R_2 R_3) / (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3)$$



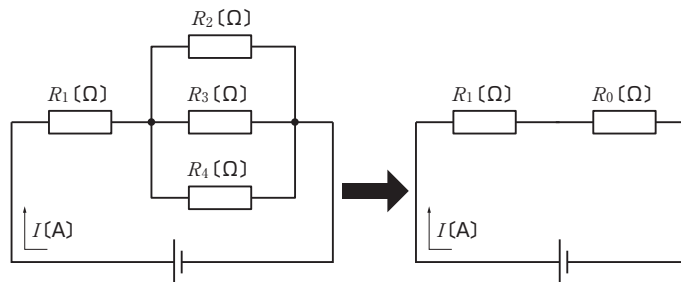
Да, Космо тоже не промах. Это правильный ответ!

Итак, как решить следующую задачу, вы, конечно, уже знаете.

Пример 3

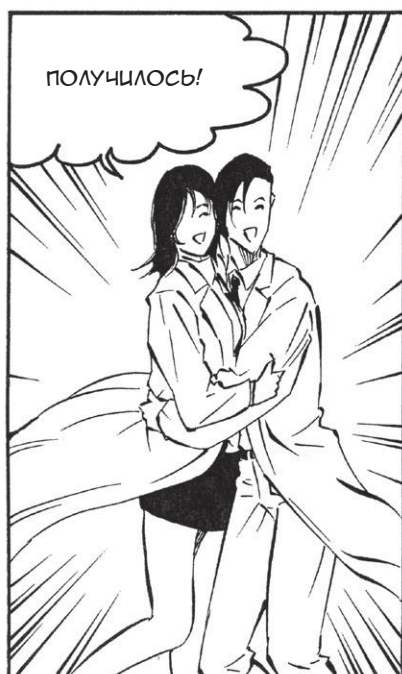


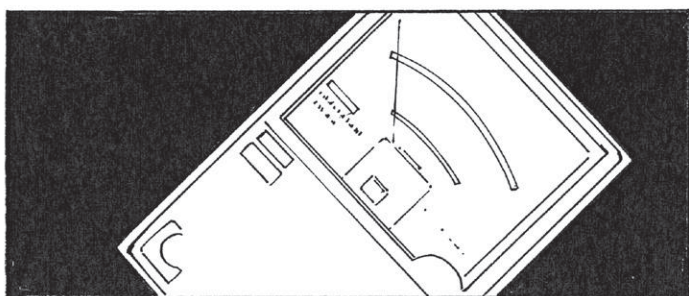
Знаем! Надо просто заменить часть с параллельным соединением, а затем сложить R_1 и R_0 , и мы получим общее сопротивление этой цепи!



Отлично. Считаю, что теперь у Фьюза – уровень 4, а у Космо – уровень 3!

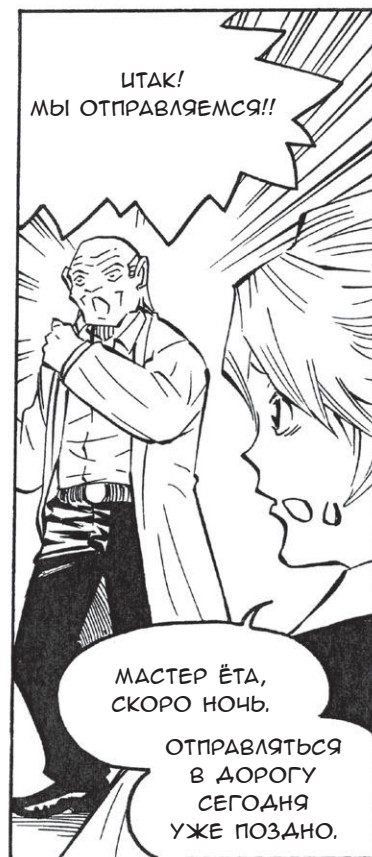


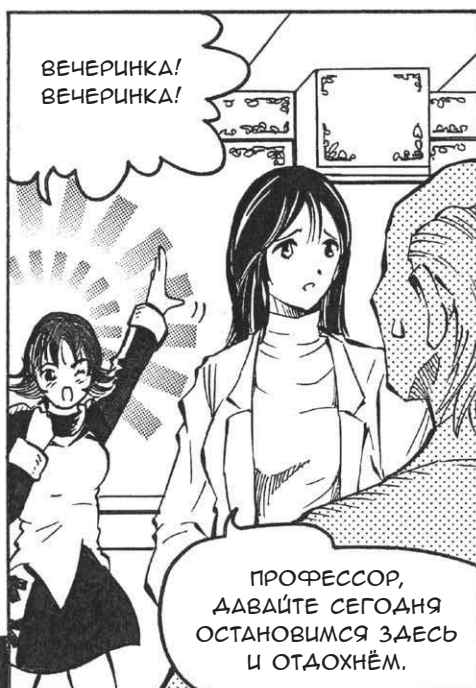






* БИС – большая интегральная схема





ФШ



ЧТО ТАКОЕ?

ЧТО
СЛУЧИЛОСЬ?

У НАС ТАКОЕ
УЖЕ ДАВНО.

СВЕТ ТО ГАСНЕТ,
ТО ВКЛЮЧАЕТСЯ.
А ИНОГДА
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА
НЕТ ЦЕЛЫМИ ДНЯМИ.

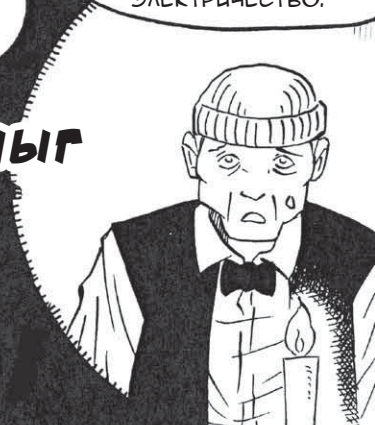
ЗА ЭТИМ ТОННЕЛЕМ
НАХОДИТСЯ ГОРОД
ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ,
ИЗ КОТОРОГО НАМ
ПОДАЮТ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

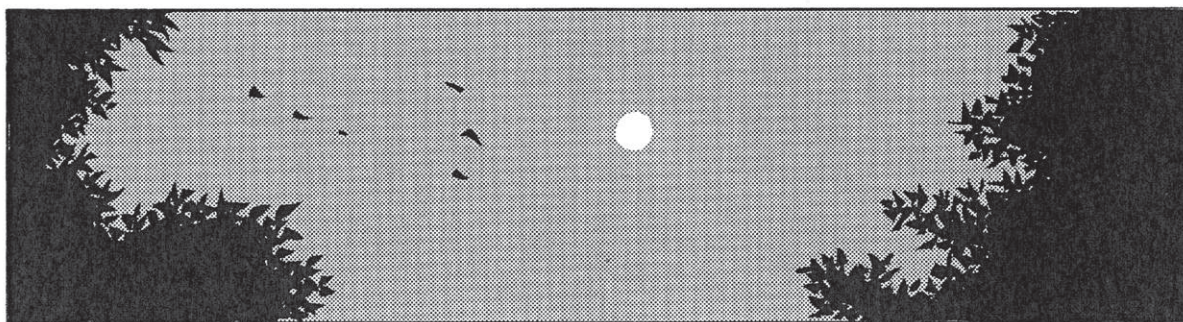
В "ДВОРЦЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА",
ЧТО НАХОДИТСЯ
В ТОМ ГОРОДЕ,
ТОЖЕ ПРОБЛЕМЫ.

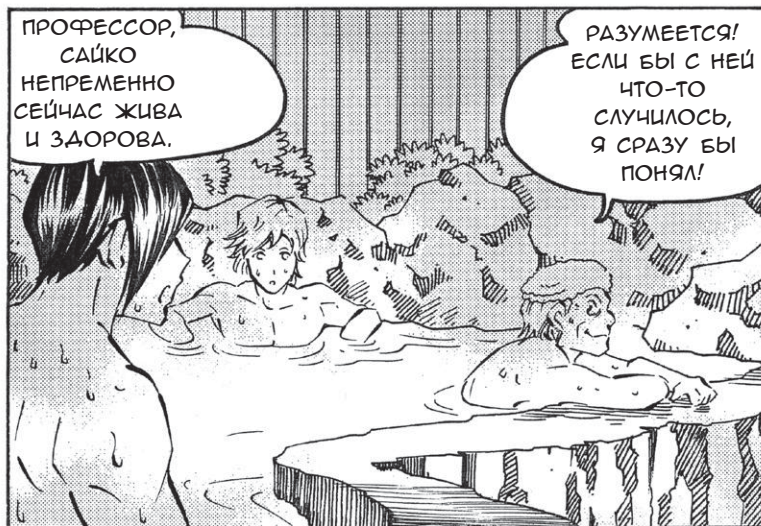
ШМЫГ

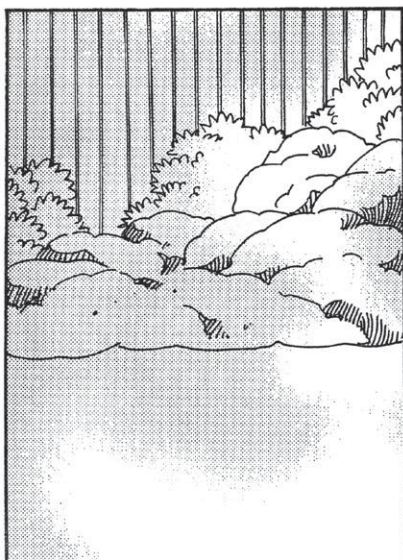
ПОХОЖЕ, ЕСТЬ
КАКИЕ-ТО ПРОБЛЕМЫ
В РАЗНЫХ МЕСТАХ.

ПОЭТОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
КАК СЛЕДУЕТ НЕ ДОХОДИТ.

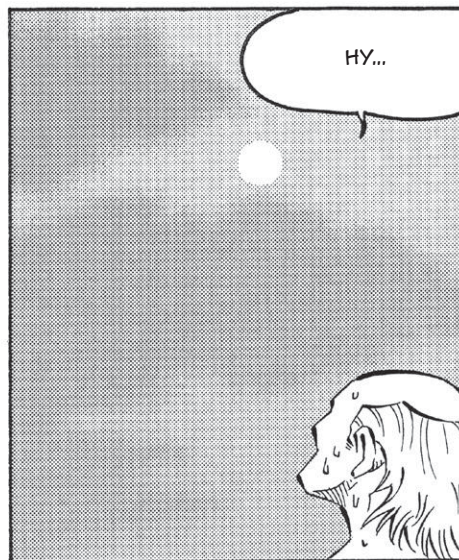




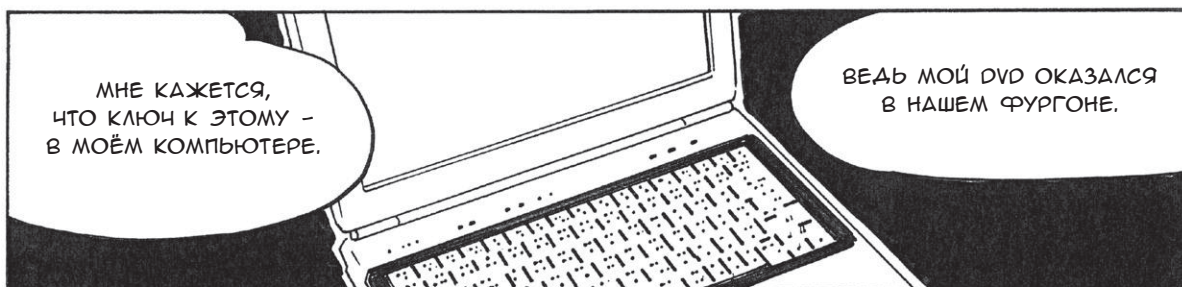




ПРОФЕССОР,
А МЫ СМОЖЕМ
ВЕРНУТЬСЯ В НАШ
ПРЕЖНИЙ МИР?



НУ...



МНЕ КАЖЕТСЯ,
ЧТО КЛЮЧ К ЭТОМУ –
В МОЁМ КОМПЬЮТЕРЕ.

ВЕДЬ МОЙ DVD ОКАЗАЛСЯ
В НАШЕМ ФУРГОНЕ.



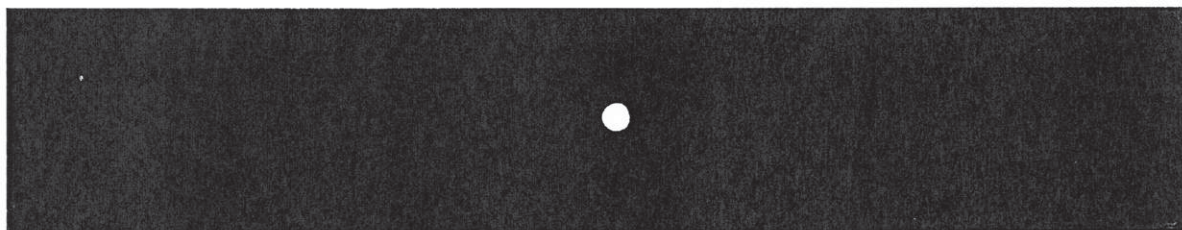
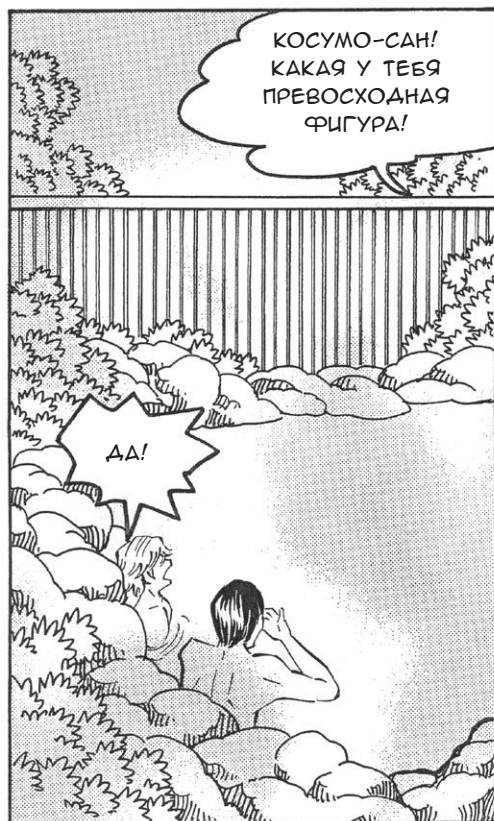
КАК ВЫ ДУМАЕТЕ,
ГДЕ МОЖЕТ БЫТЬ
ВАШ КОМПЬЮТЕР?

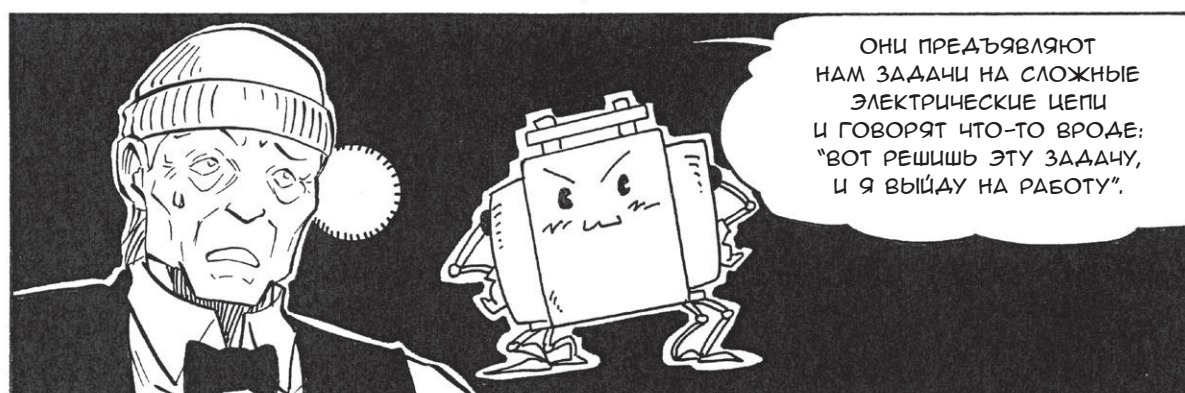
НУ, Я ПОИЩУ
В РАЗНЫХ МЕСТАХ.

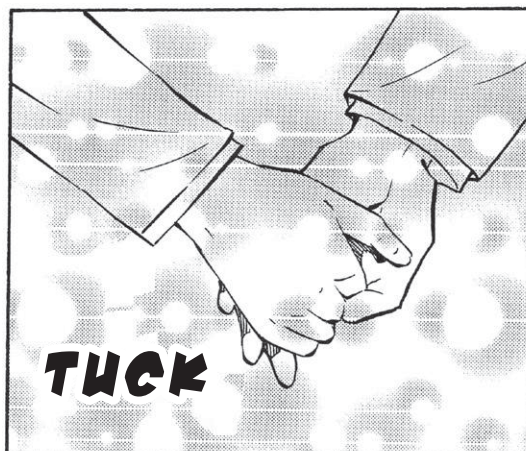
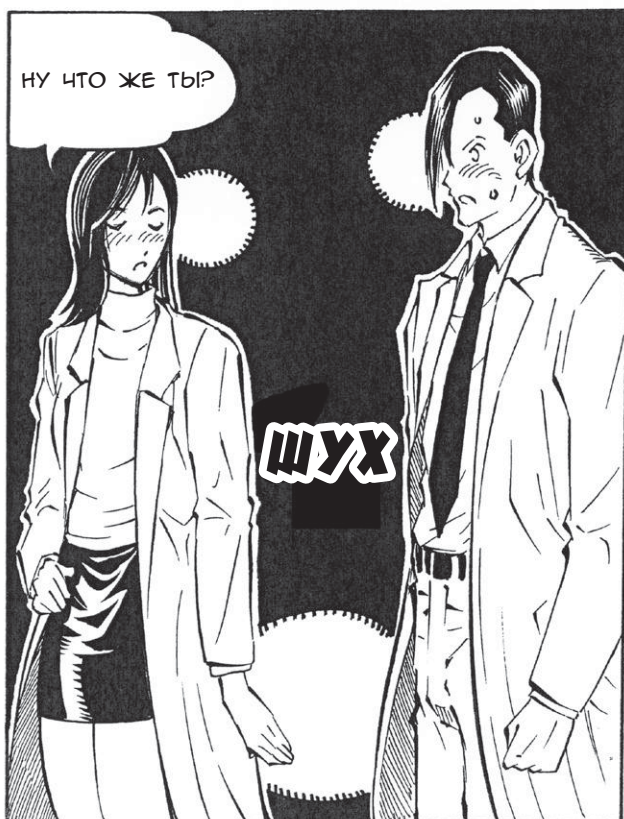
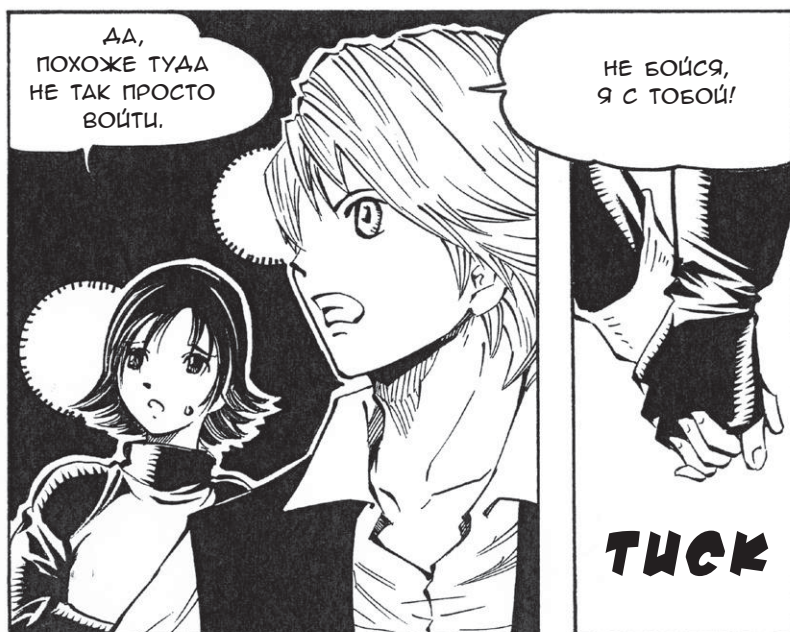


МАСТЕР ЁТА,
НАУЧИ МЕНЯ ДЕЛАТЬ
ЕЩЁ БОЛЬШЕ
РАЗНЫХ ШТУКОВИН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.

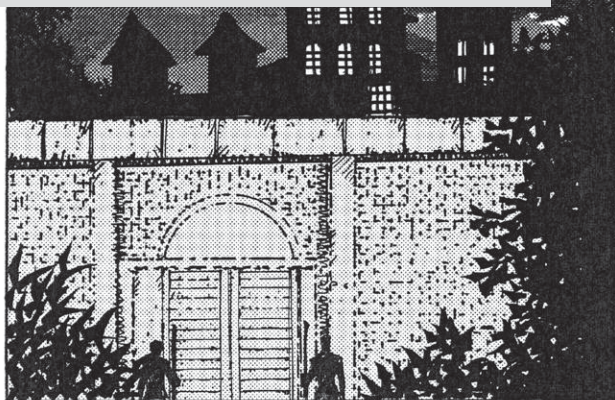
ЛАДНО,
НО ПЕРЕД ЭТИМ
ТЕБЕ НУЖНО ЕЩЁ
НЕМНОГО ИЗУЧИТЬ
ОСНОВЫ.







4. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ



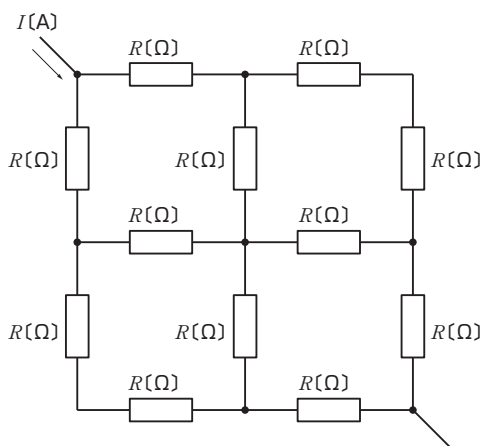




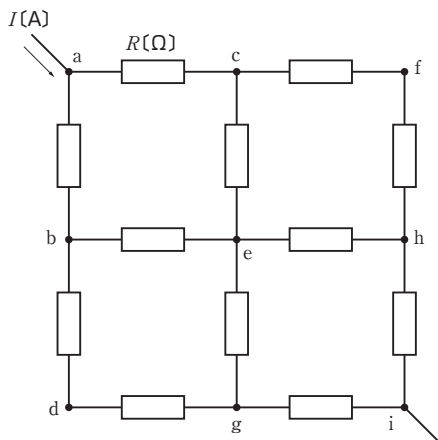
РАСЧЁТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ



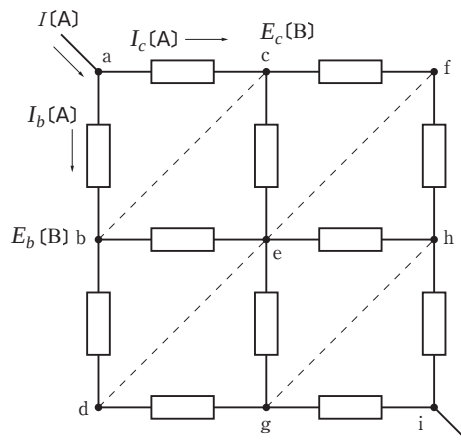
По сути, эквивалентная схема – это расчёт общего сопротивления. Поэтому Фьюз сказал верно. Однако бывают также довольно запутанные цепи. Например, вот эта. Попробуйте-ка выразить эту параллельную цепь с помощью эквивалентной схемы. При этом можете считать, что все сопротивления в ней равны R Ом.



Хе-хе! Пожалуйста. Сначала мы обозначим все узлы буквами. Затем будем смотреть, что происходит с током I .



Обозначаем все соединения буквами для наглядности



Соединяем точки с одинаковой разностью потенциалов с помощью пунктирных линий

Так как все сопротивления одинаковы, то для токов, идущих в узлы b и c :

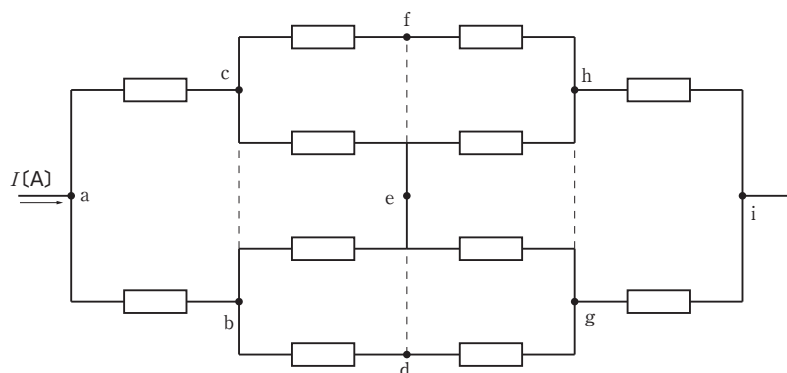
$$I_b = I_c$$

Это означает, что потенциалы в узлах b и c тоже равны между собой. То есть:

$$E_b = E_c$$

Размышляя аналогично, получим:

$$E_d = E_e = E_f, E_g = E_h$$



Так как между точками с одинаковой разностью потенциалов ток не будет течь, даже если соединить их проводником...



Точки с одинаковыми разностями потенциалов можно без проблем соединить проводниками! Окончательная эквивалентная схема будет иметь следующий вид, не так ли?



Вот какой будет эквивалентная схема!



Космо, какая ты сообразительная!
Уровень Фьюза – 5, уровень Космо – тоже 5.

5. ПРАВИЛА КИРХГОФА

■ ФУНДАМЕНТ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ



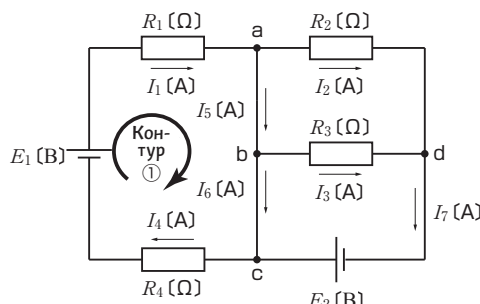
Итак, перейдём к правилам Кирхгофа. Для расчёта цепей эти правила – одна из самых полезных вещей. Если вы их поймёте, то справитесь с любой схемой. Фьюз, сможешь вычислить общее сопротивление этой схемы?



Нет. Закон Ома здесь не помогает!



Для этой схемы неприменимы формулы общего сопротивления последовательно-параллельной цепи на основе закона Ома. Однако правила Кирхгофа позволяют легко рассчитывать и такие цепи. Этих правил всего два. Первое называют правилом сохранения заряда: «Сумма токов, входящих в любую точку (узел) электрической цепи, равна сумме токов, выходящих из этой точки (из этого узла)». Второе называют правилом падений напряжения: «Алгебраическая сумма ЭДС источников в замкнутом контуре равна сумме падений напряжения на приёмниках этого контура». Взгляните на схему. Рассмотрим, например, точку *a*. Скажи мне, Фьюз, что будет с токами в ней?



$$I_1 = I_2 + I_5, \text{ так?}$$



Да. А теперь ты, Космо, расскажи мне про точку *b*.



По-моему, в ней

$$I_5 = I_3 + I_6.$$



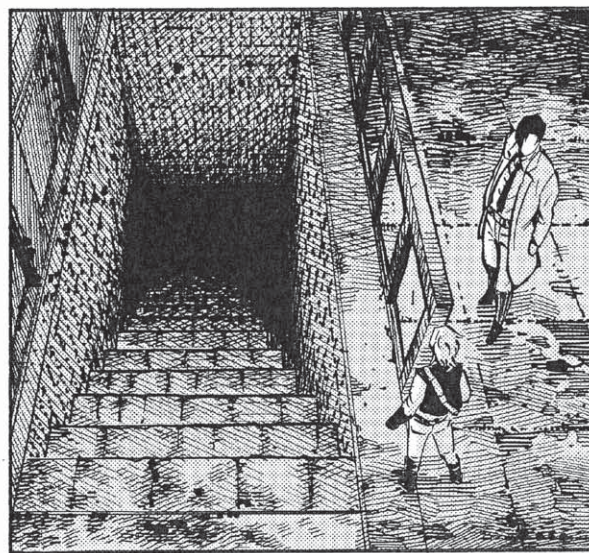
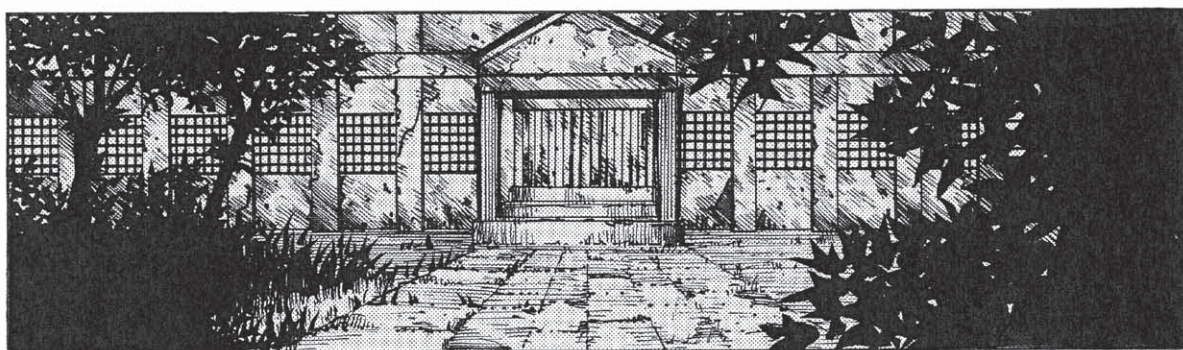
Да, всё-таки Космо быстро соображает. Итак, теперь поговорим о напряжениях. Попробуйте изучить левый замкнутый контур. Будем считать, что стрелка «Контур (1)» показывает положительное направление токов и напряжений в нём.

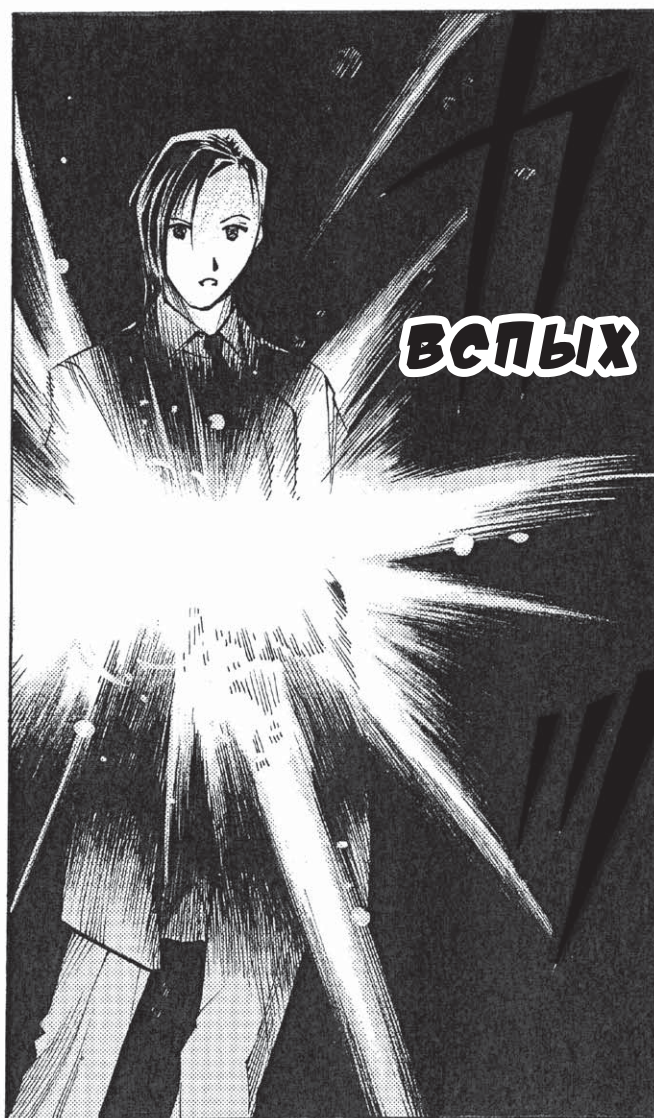
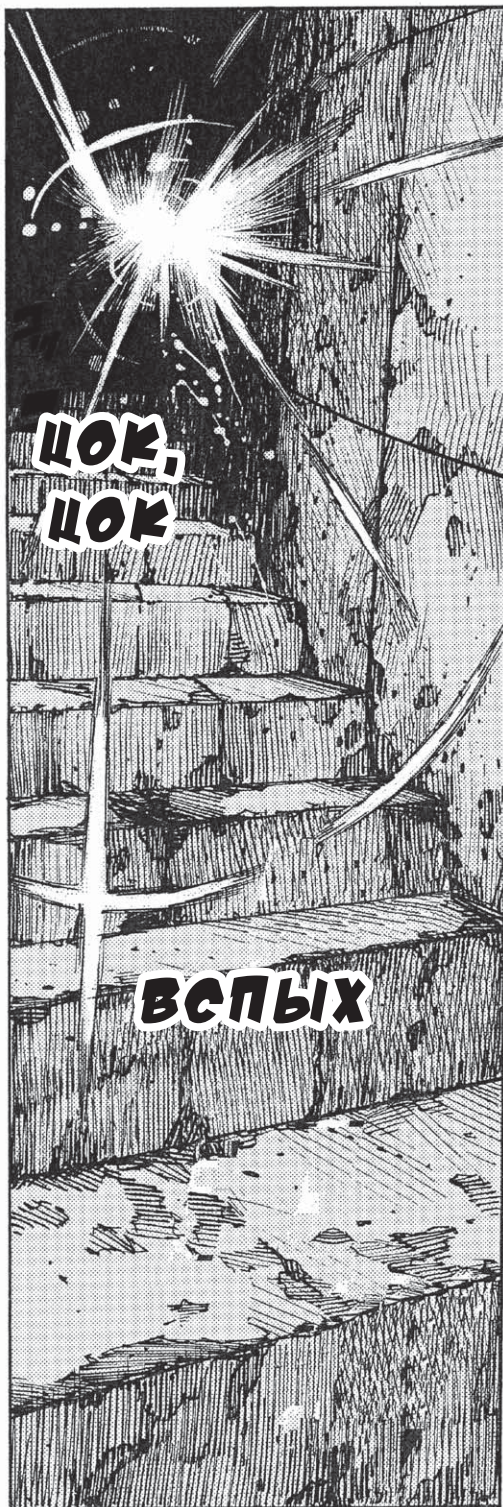


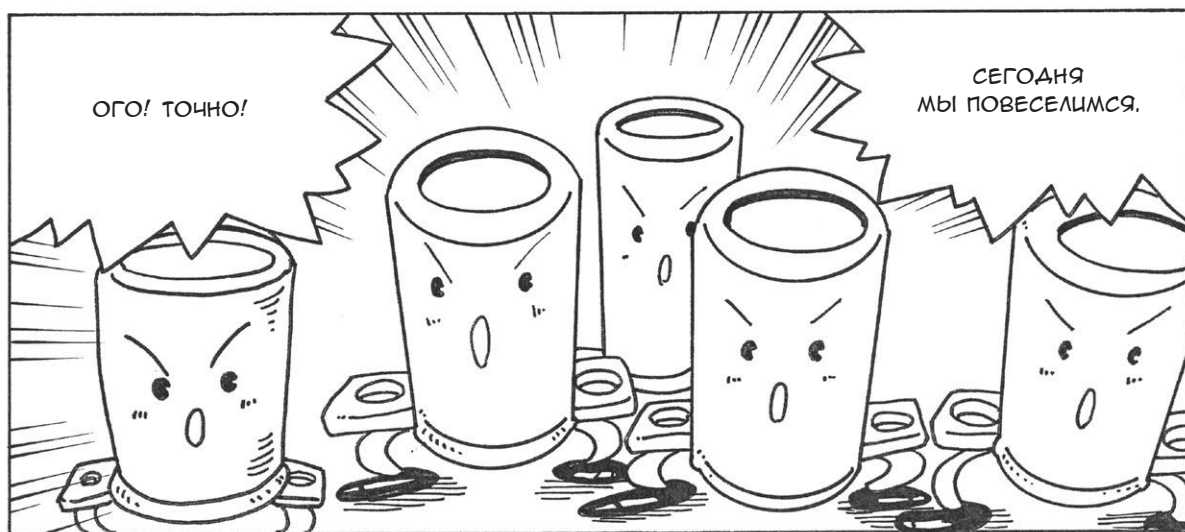
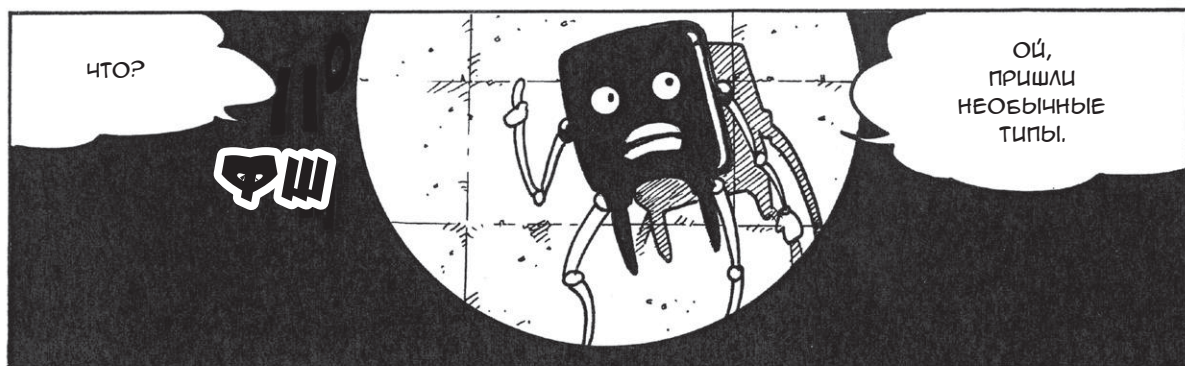
Так... В левой половине есть приёмники R_1 и R_4 , через которые протекают токи I_1 и I_4 соответственно, поэтому напряжения на каждом из этих приёмников равны $I_1 R_1$ и $I_4 R_4$ соответственно. Значит, $I_1 R_1 + I_4 R_4$ равно E_1 , не так ли?

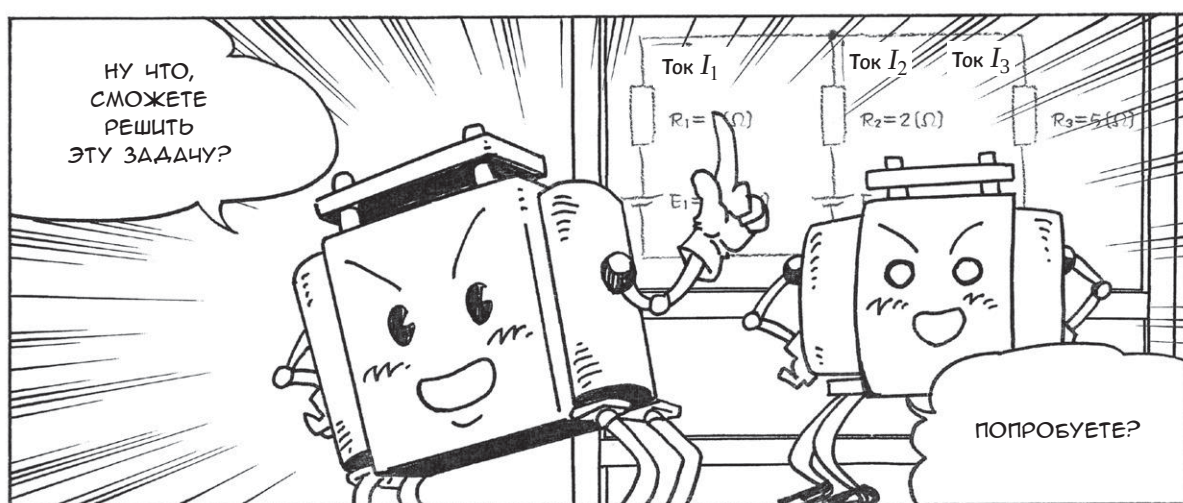
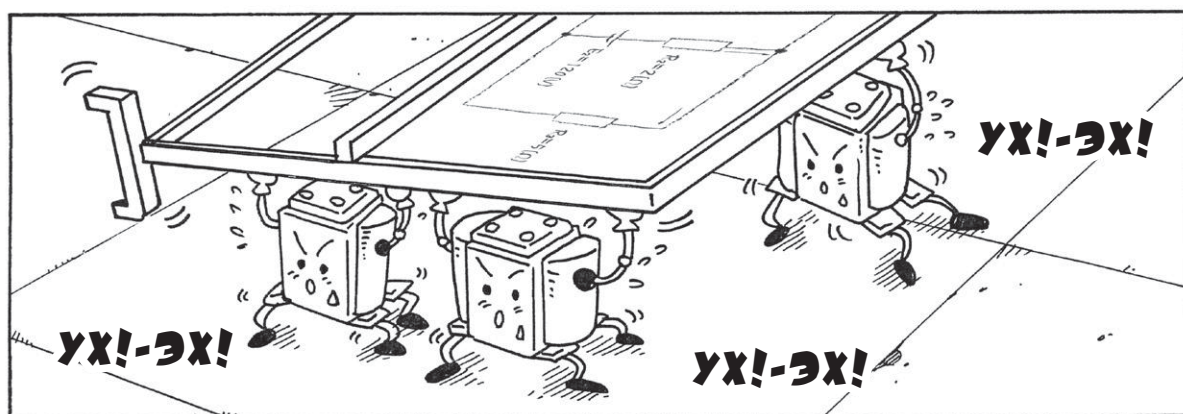
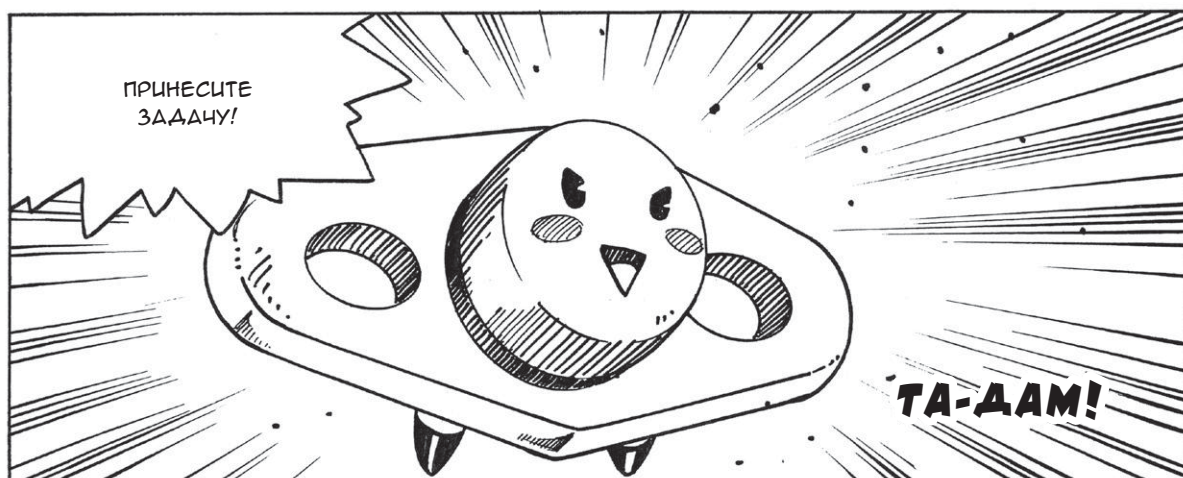


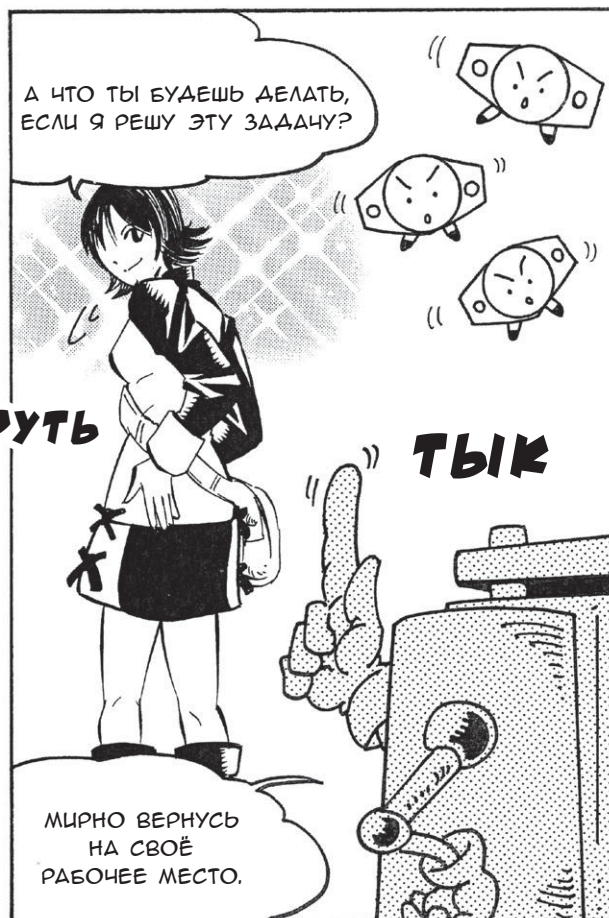
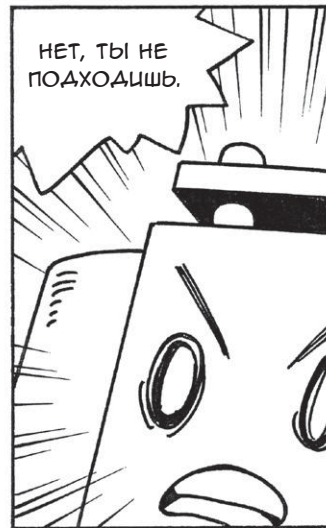
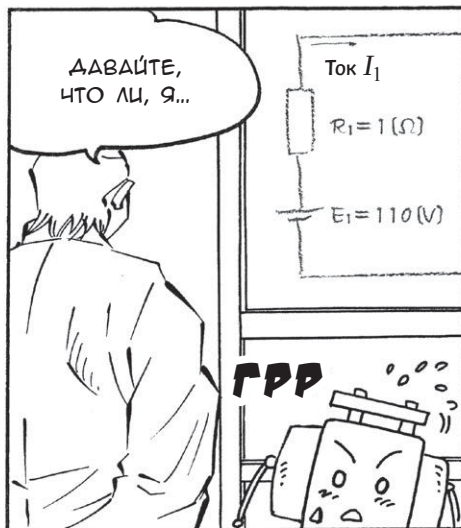
Молодец. Ну, теперь нам бояться, наверное, нечего. Пойдём во Дворец!















Вот эта задача. В ней надо найти токи I_1 , I_2 и I_3 . Решить её можно по-разному, но я выберу самый понятный способ. Надо только обозначить на этой схеме два контура. Применяя правило Кирхгофа для тока в точке А, получаем:

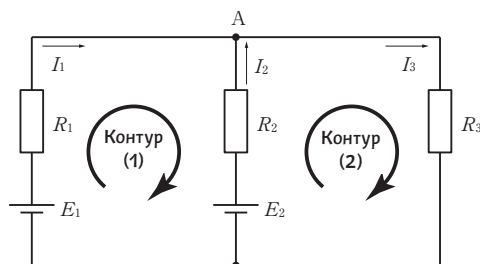
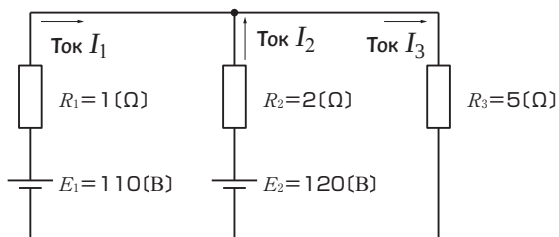
$$I_1 + I_2 = I_3$$

Рассматривая напряжения в контуре (1), обращаем внимание, что в средней ветви и ток I_2 , и напряжение E_2 имеют направление, противоположное положительному направлению контура (1). Поэтому мы должны записать:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2$$

Далее, рассматривая контур (2), замечаем, что направление обоих токов I_2 и I_3 совпадает с положительным направлением контура (2), поэтому мы получим:

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2$$



Так держать! Космо!



Всё это можно кратко записать так:

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1)$$

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 \quad (2)$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 \quad (3)$$

R_1 , R_2 и R_3 равны 1 Ом, 2 Ом и 5 Ом соответственно. E_1 и E_2 равны 110 В и 120 В соответственно. Подставляя это в уравнение (2), получим:

$$\begin{aligned} I_1 - 2I_2 &= 110 - 120 = -10 \\ I_1 &= 2I_2 - 10 \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение (3) примет следующий вид:

$$2I_2 + 5I_3 = 120 \quad (5)$$

Из уравнения (1) следует, что:

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Подставим это в уравнение (5):

$$\begin{aligned} 2I_2 + 5(I_1 + I_2) &= 120 \\ 7I_2 + 5I_1 &= 120 \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив уравнение (4) в уравнение (6):

$$7I_2 + 5(2I_2 - 10) = 120$$

Решив это, получим:

$$\begin{aligned} 17I_2 - 50 &= 120 \\ 17I_2 &= 170 \\ I_2 &= 10 \end{aligned}$$

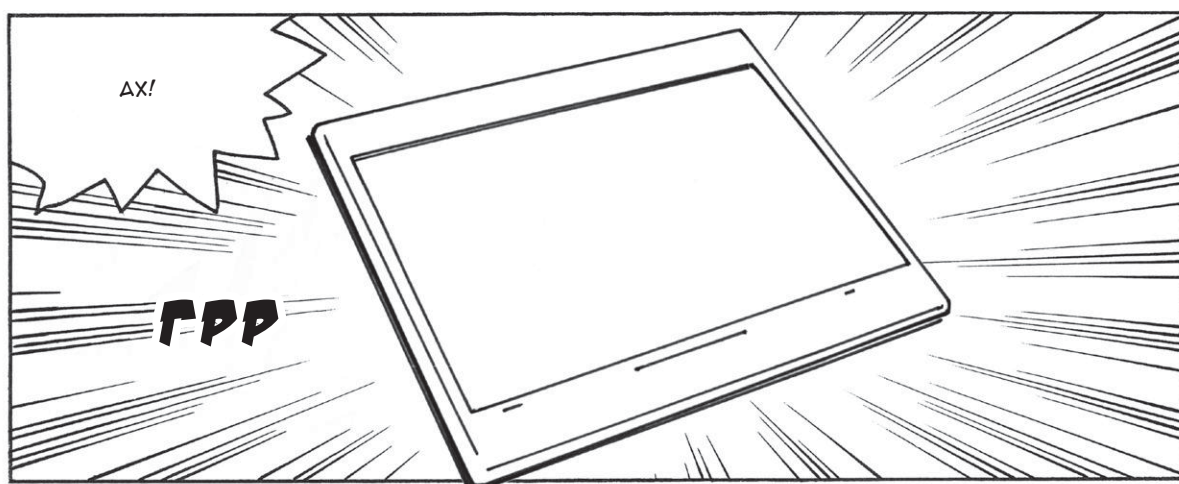
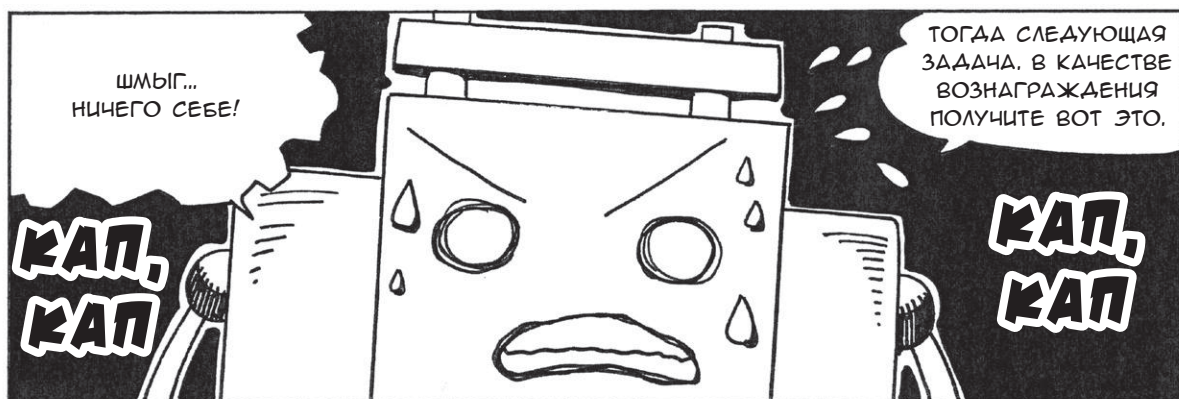
Находим I_1 из уравнения (4):

$$\begin{aligned} I_1 &= 2 \cdot 10 - 10 = 10 \\ I_1 &= 10 \end{aligned}$$

Находим I_3 из уравнения (1)

$$\begin{aligned} I_3 &= 10 + 10 = 20 \\ I_3 &= 20 \end{aligned}$$

Ответ такой: $I_1 = 10 \text{ A}$, $I_2 = 10 \text{ A}$, $I_3 = 20 \text{ A}$!





Найдите ток I_1 , текущий в этой цепи. Внутренним сопротивлением источников можно пренебречь.



Фьюз, твоя очередь.



Да...



Надеюсь, ты это понимаешь?



Да.. В этой схеме мы тоже выделим контуры (1), (2) и будем применять правила Кирхгофа.

Рассмотрим токи в точке А. Так как нет токов, выходящих из этой точки, значит:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Для контура (1):

$$8I_1 - 2I_2 = 6 - 4$$

Для контура (2):

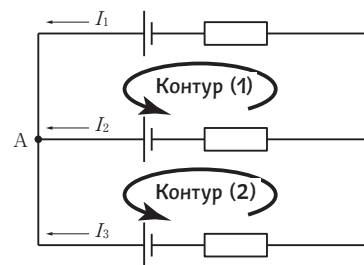
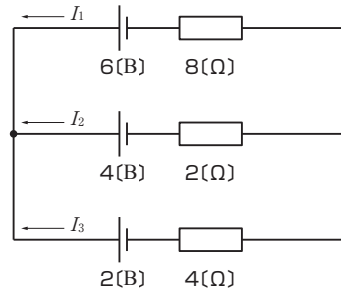
$$2I_2 - 4I_3 = 4 - 2$$

Подытожив это, как в прошлый раз сделала Космо:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1)$$

$$8I_1 - 2I_2 = 6 - 4 = 2 \quad (2)$$

$$2I_2 - 4I_3 = 4 - 2 = 2 \quad (3)$$



Из уравнения (1):

$$I_3 = -(I_1 + I_2) \quad (4)$$

Подставляем уравнение (4) в уравнение (3):

$$\begin{aligned} 2I_2 - 4[-(I_1 + I_2)] &= 2 \\ 2I_2 + 4I_1 + 4I_2 &= 2 \\ 6I_2 + 4I_1 &= 2 \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения (2):

$$\begin{aligned} -2I_2 &= 2 - 8I_1 \\ I_2 &= 4I_1 - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляем уравнение (6) в уравнение (5):

$$\begin{aligned} 6(4I_1 - 1) + 4I_1 &= 2 \\ 24I_1 - 6 + 4I_1 &= 2 \\ 28I_1 &= 8 \end{aligned}$$

$$I_1 = 8/28 \approx 0,29 \text{ A}$$

Ответ: примерно 0,29 А!



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ (ДЖОУЛЕВО ТЕПЛО), ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ, МОСТ УИТСТОНА, ТЕОРЕМА НАЛОЖЕНИЯ

■ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ (ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ)

Электроэнергия – это электрическая мощность постоянного тока, помноженная на время его действия.

Электроэнергия [Вт·с] = Электрическая мощность[Вт] × Время действия [с]

Электроэнергию можно заменить джоулевым теплом, тогда её единицей измерения будет джоуль [Дж].

1 Дж = 1 Вт·с, 3600 Вт·с = 1 Вт·ч

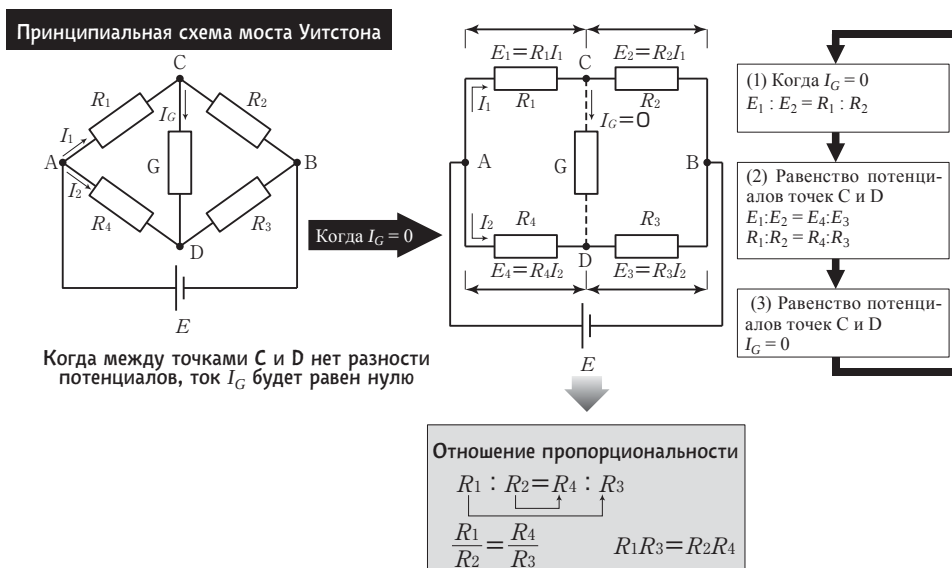
1 ч = 60 мин · 60 с = 3600 с

■ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Коэффициент пропорциональности, показывающий способность проводить электрический ток. Обратна сопротивлению R . Выражается как $G = 1/R$.

■ МОСТ УИТСТОНА

Электрическая схема, используемая в основном для измерений

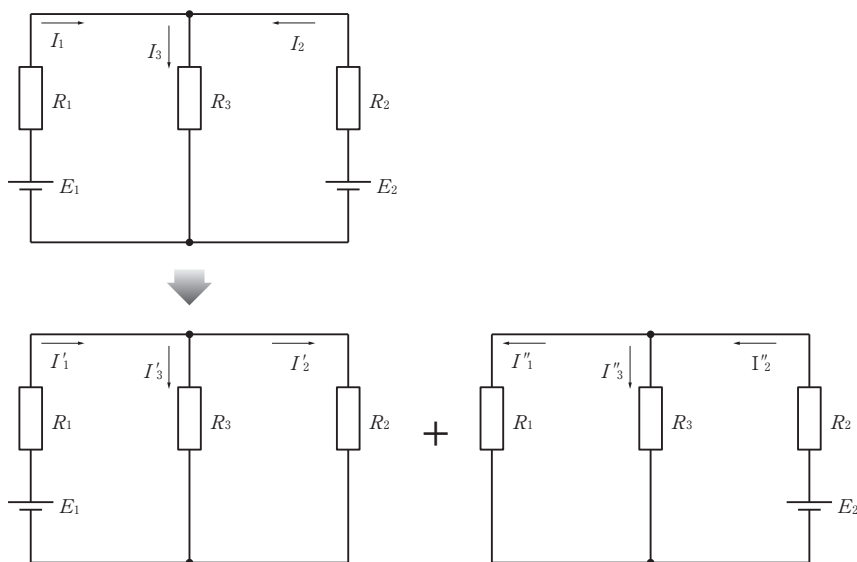


■ ТЕОРЕМА НАЛОЖЕНИЯ

Если цепь содержит множество ЭДС, то напряжение или ток в любой ветви этой цепи равны сумме частичных напряжений или токов, создаваемых каждой ЭДС в отдельности.

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_1 - I''_1 \\ I_2 &= -I'_2 + I''_2 \\ I_3 &= I'_3 + I''_3 \end{aligned}$$

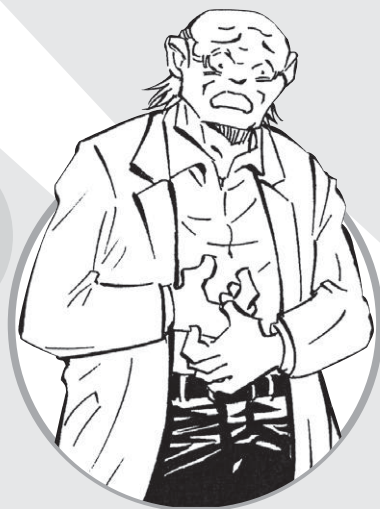
Другими словами, получается следующее:



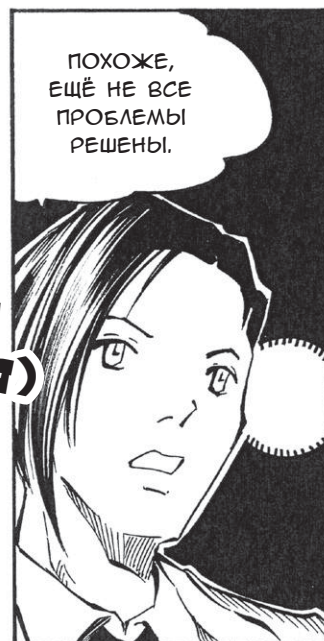
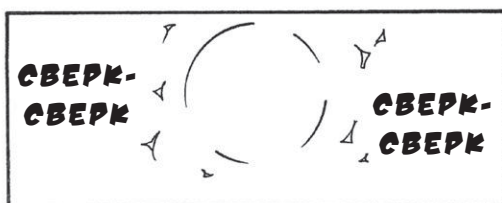
Обратите внимание, что здесь за положительные направления я принял направления токов I_1 , I_2 и I_3 , поэтому в случае противоположного направления нужно использовать знак «минус».

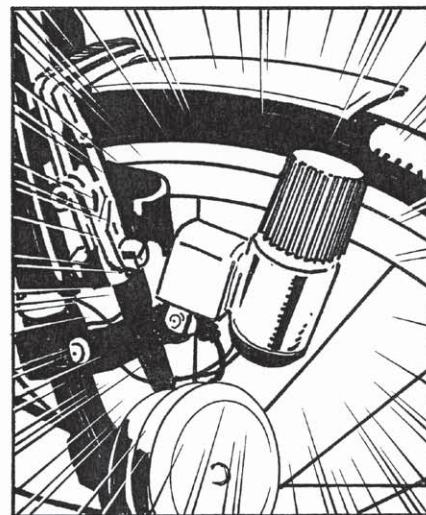
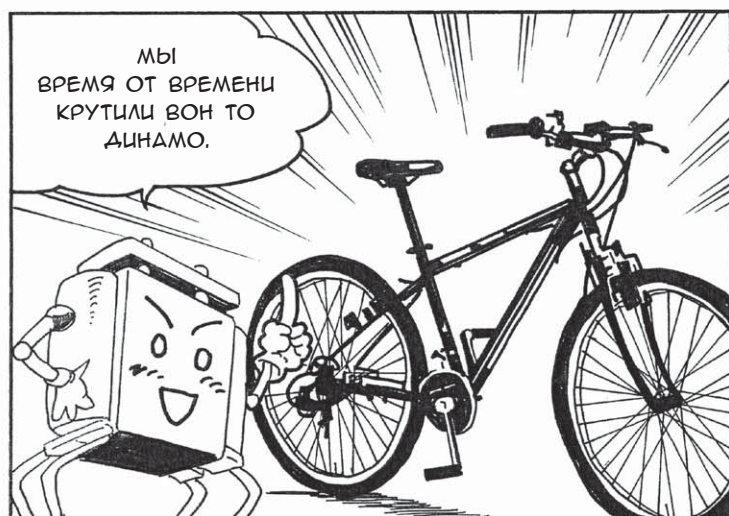
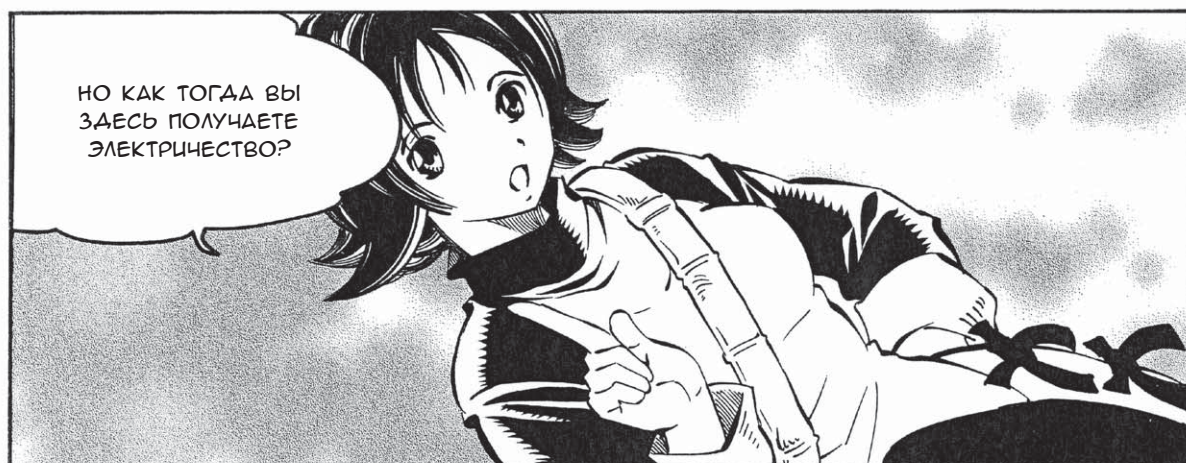
ГЛАВА 3

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

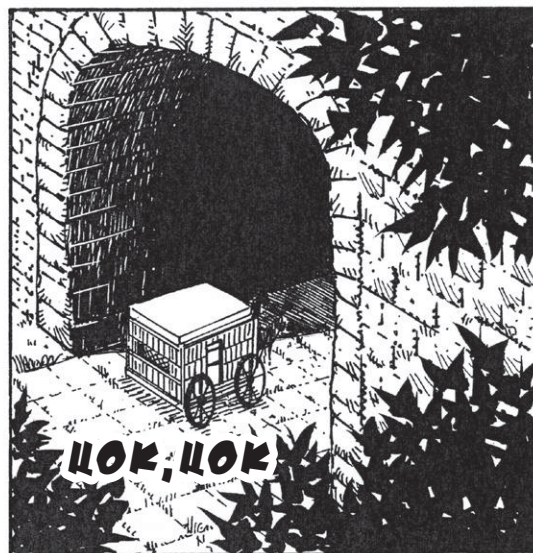


1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ







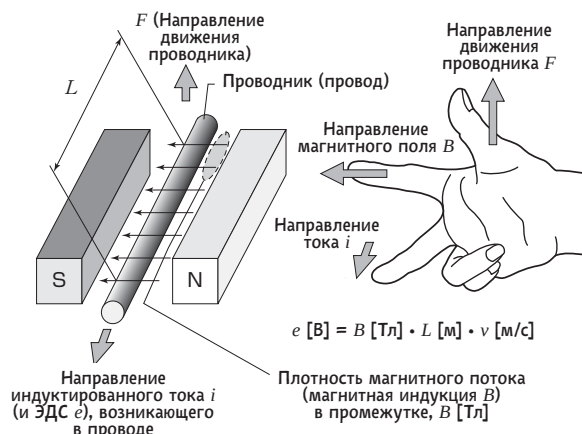




Мастер Ёта, как такое простое устройство может зажечь свет?



Между электрическим и магнитным полями существует тесная взаимосвязь. Когда в магнитном поле движется проводник, возникает электрический ток, направление которого определяется «правилом правой руки Флеминга». Возникающую при этом ЭДС можно найти так:



ЭДС индукции $e [В] = \text{Магнитная индукция } B [Тл] \times \text{Длина проводника } L [м] \times \text{Скорость } v [м/с]$

Динамо, которое я сделал, состоит из неподвижной катушки индуктивности и вращающегося постоянного магнита. Просто механическая часть такой конструкции более долговечна... Возникающий при этом электрический ток будет переменным. Космо, знаешь ли ты про переменный ток?



Мм... Вроде бы у него значения тока и напряжения изменяются со временем.



Верно. Далее, переменный ток может быть, например, треугольным, прямоугольным, пилообразным, или другой формы. Однако для начала давайте изучим самый основной – синусоидальный. Как ясно из самого названия «синусоида», он имеет отношение к тригонометрическим функциям.



Ой, я в этом не силен!



Нет, Фьюз, так не пойдёт. Ведь в следующем «Городе переменного тока» нам придётся иметь дело с цепями переменного тока.

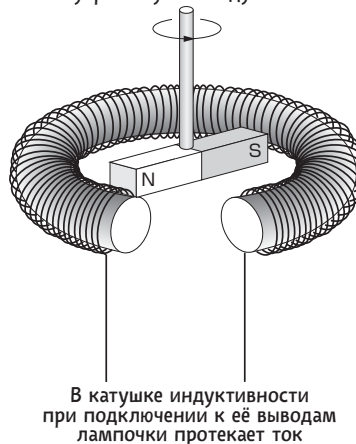


Я не хочу тебя напугать, но кроме тригонометрических функций будут использоваться также векторы, производные и интегралы.



Ох, у меня уже голова заболела.

Принцип работы электрического генератора
Вращаем постоянный магнит
внутри катушки индуктивности



2. СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК



Как вы думаете, какая форма волны будет у тока этого динамо?



Ой, не знаю...



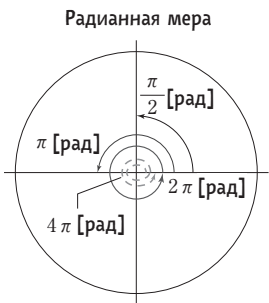
Взгляни на этот рисунок. На нём показано, как будет выглядеть ЭДС, которую мы получим, если будем вращать проводник в форме рамки внутри магнитного поля. ЭДС e приблизительно равна напряжению на зажимах катушки при её замыкании, например, на лампочку. Возникающая ЭДС пропорциональна скорости перемещения проводника в направлении, перпендикулярном магнитному потоку (магнитной индукции). То есть, ЭДС изменяется в зависимости от скорости и положения вращающегося проводника. График этих изменений показан на этом рисунке. Другими словами, получается синусоида. Возникающую при этом ЭДС обозначают e , это мгновенное значение. Если обозначить максимальное значение (амплитуду) за E_m , то будет выполняться следующее соотношение:

$$e = E_m \sin \varphi \text{ [В]}$$



φ здесь означает угол поворота рамки. Когда вектор нормали рамки расположен перпендикулярно магнитному потоку, то этот угол равен 90° , когда рамка прошла пол-оборота, угол равен 180° , а через один полный оборот он будет равен 360° . Углы вращения объектов принято выражать в радианной мере (рад). Приведу здесь таблицу соответствия между различными мерами вращения.

Число оборотов	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	2
Градусы ($^\circ$)	90°	180°	360°	720°
Радианы (рад)	$\frac{\pi}{2}$	π	2π	4π



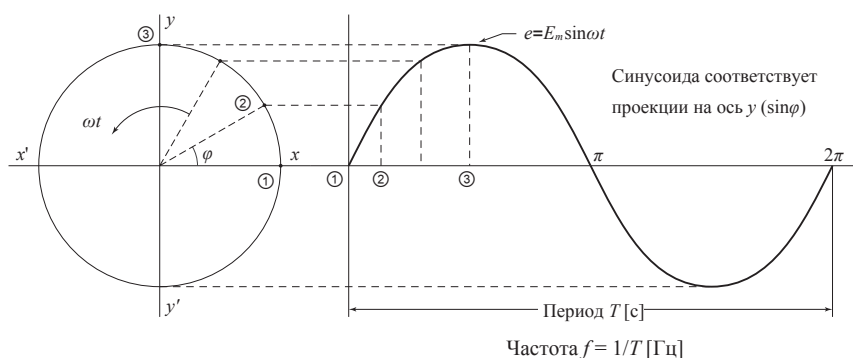


В случае, например, генератора, для выражения числа оборотов, которое рамка делает за 1 секунду, используют величину, называемую угловой частотой. Её обозначают ω (омега), а её единицей измерения является рад/с. Если для поворота на угол φ рад потребовалось время t секунд, то с помощью угловой частоты его можно выразить так:

$$\varphi = \omega t$$

Значит переменную ЭДС, о которой только что шла речь, можно выразить так:

$$e = E_m \sin \omega t \text{ [В]}$$



Далее, время, которое затрачивается при изменении угла от 0 до 2π , то есть за один оборот, называют периодом T . Число периодов, повторяющихся за 1 секунду, называют частотой f и выражают в [Гц] (герцах). Но что, поняли?



Мда... Появился синус, поэтому я не уверен в себе...



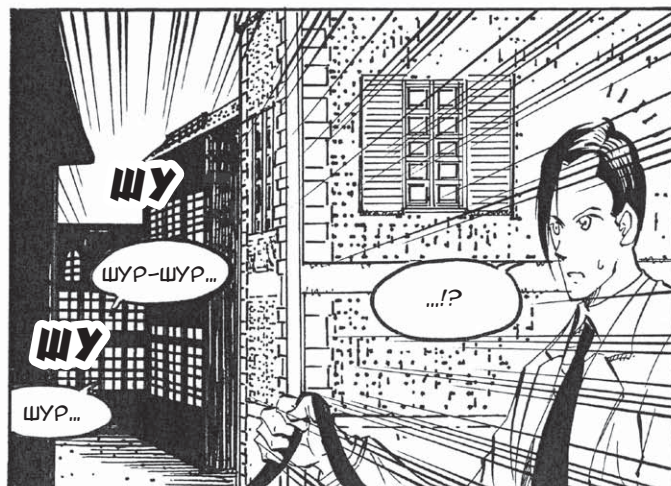
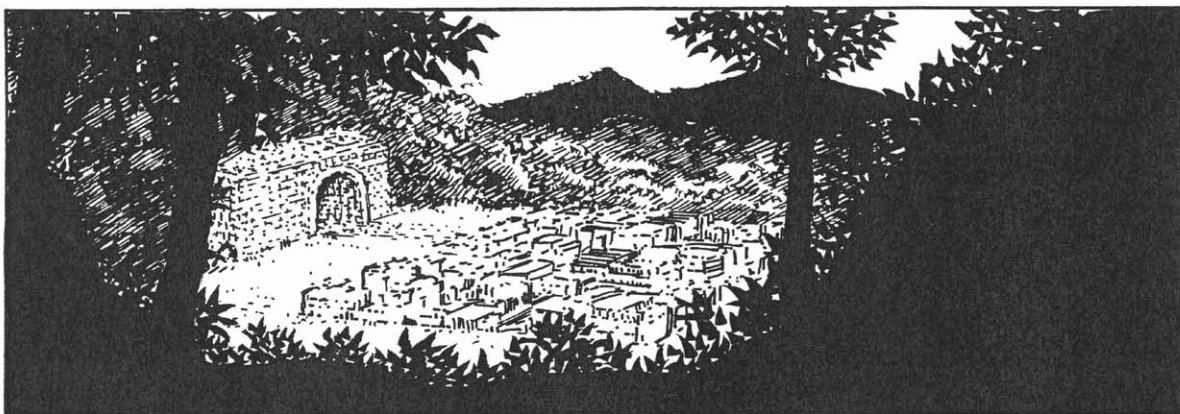
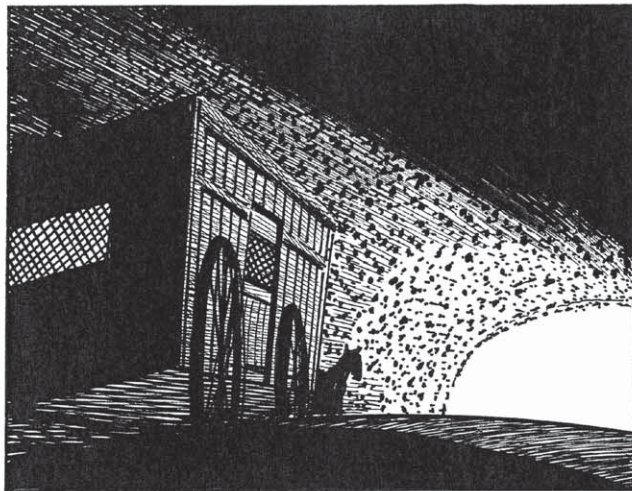
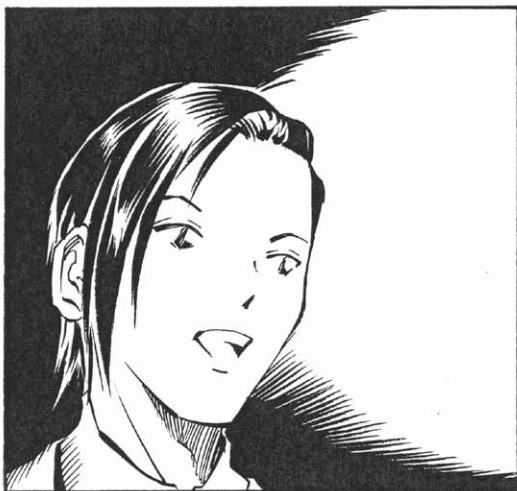
Ничего, как-нибудь справишься. Надо лишь набраться опыта и привыкнуть.



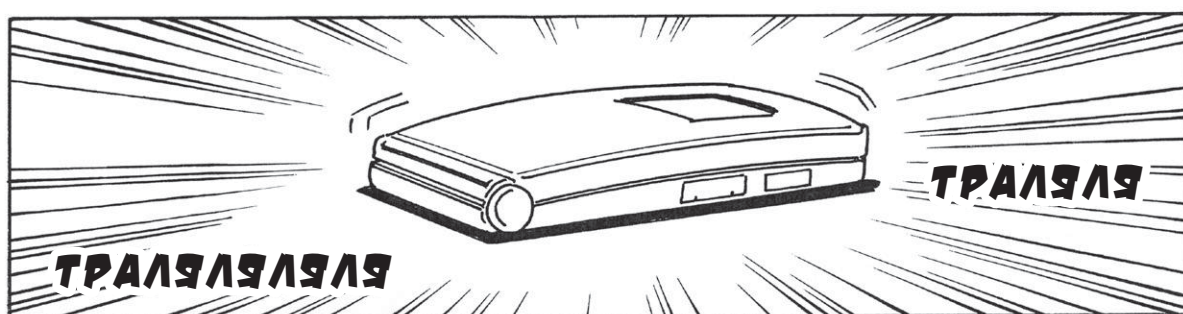
Фьюз сказал, что слаб в математике, поэтому уровень его силы – без изменений. Уровень силы Космо – 7. Наверное, Космо быстрее освоит электрические цепи.

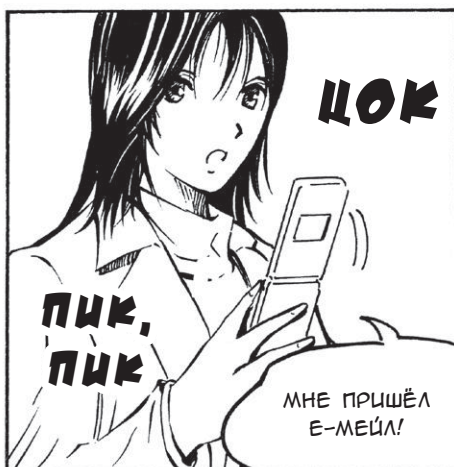
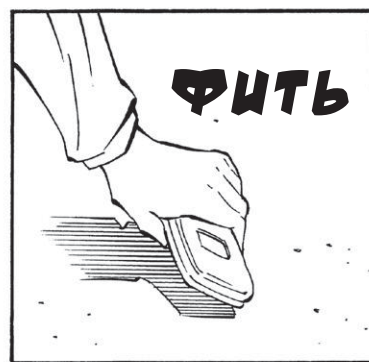
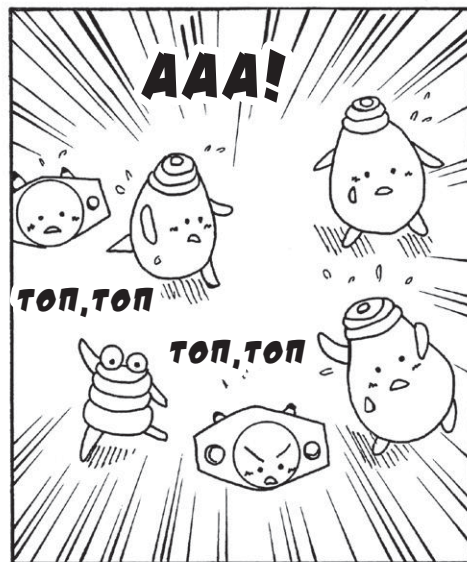
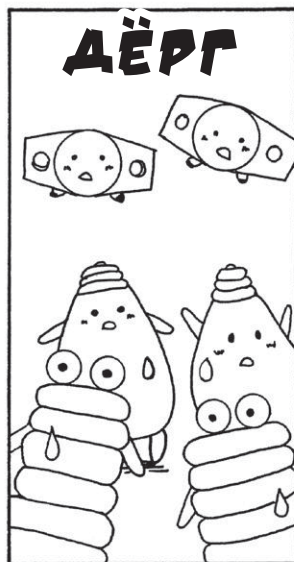
3. СРЕДНЕЕ И ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА



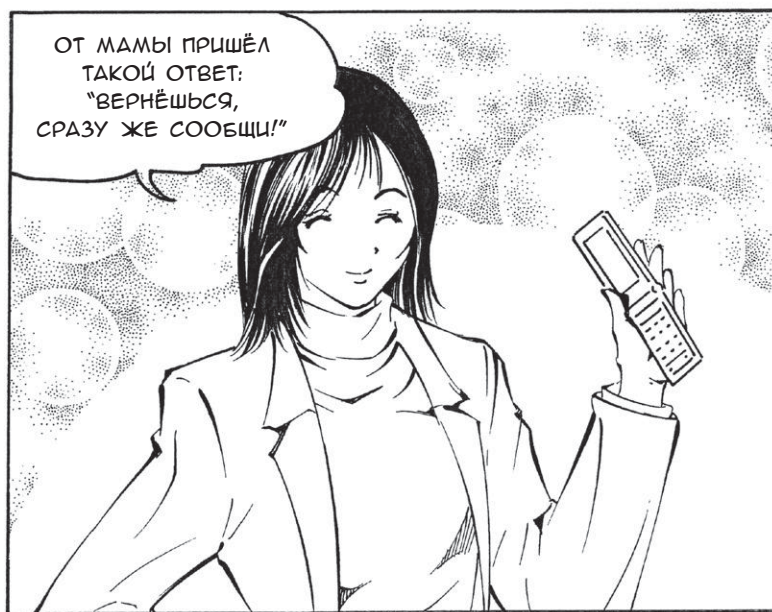
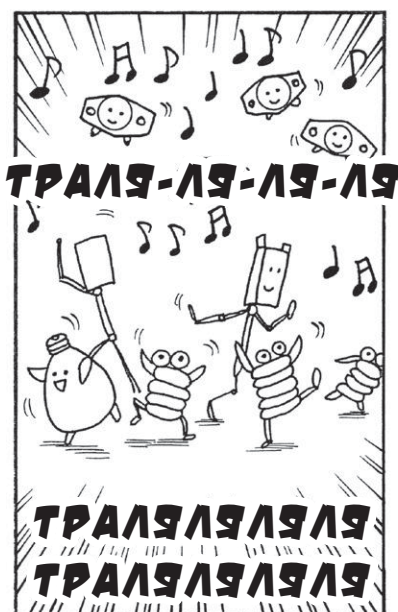
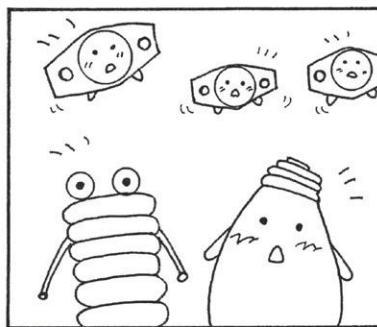


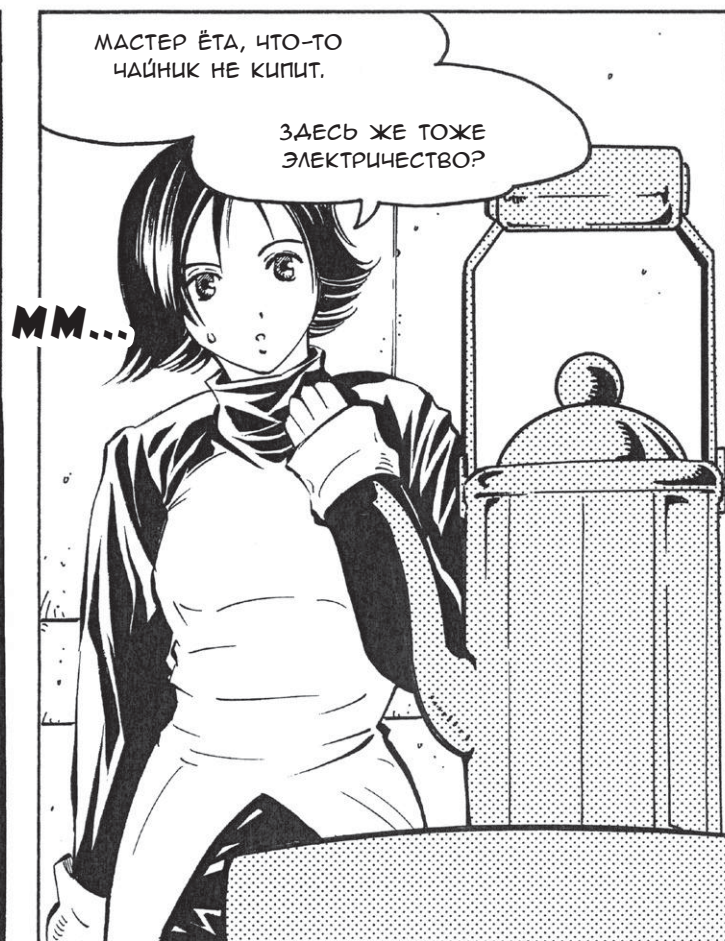










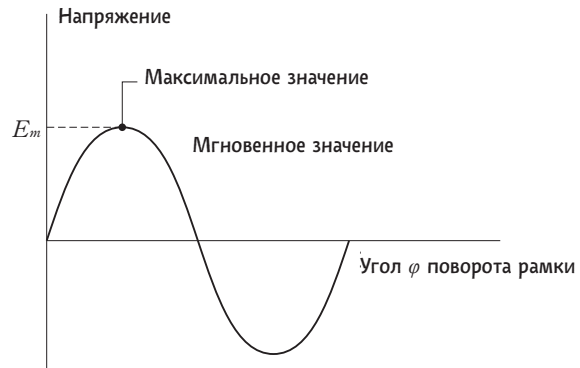




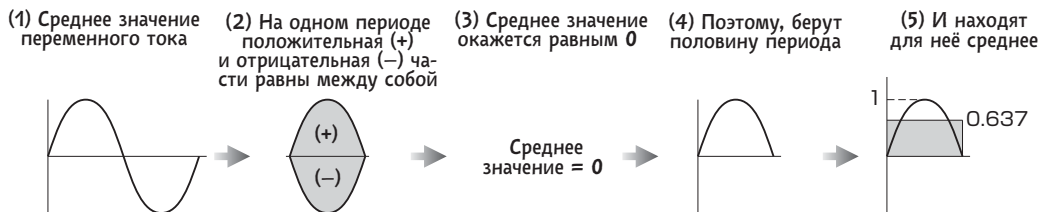


Самая верхняя точка этой волны называется максимальным значением. Оно зависит от магнитной индукции, длины проводника, скорости движения проводника в данный момент. Направление ЭДС и тока можно определить с помощью «правила правой руки Флеминга», которое мы недавно изучили. Далее, напряжение в любой момент времени называют «мгновенным значением». Как я недавно объяснял, мгновенное и максимальное значения связаны между собой следующим соотношением:

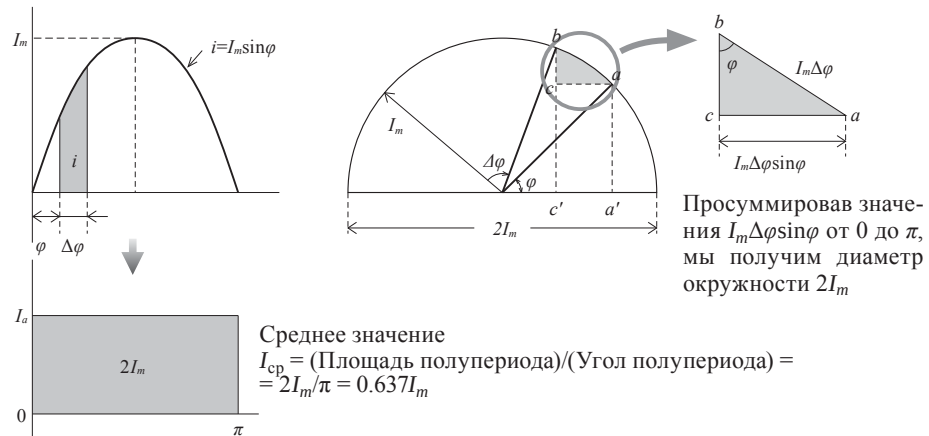
$$e = E_m \sin \varphi$$



Среднее значение рассчитывается на основе мгновенных значений за один период, но дело в том, что для синусоиды оно окажется равным 0, поэтому рассматривают половину периода.



Среднее значение рассчитывается следующим образом:*



Теперь изучим действующее значение. Именно оно в основном используется при расчёте цепей.



Но, может быть, тогда можно обойтись без всяких там мгновенных, средних значений?

* На рисунке показан графический метод вычисления интеграла от 0 до $\pi I_m \sin \varphi d\varphi$ (прим. перев.).



Не спешите. Дело в том, что бывают измерительные приборы, которые отображают не действующее значение, а среднее. И чтобы пересчитать его в действующее, нужно понимать, что такое среднее значение. Всякие тригонометрические функции и вектора появляются не просто так. Очень важно их хорошенько усвоить и научиться применять на практике. Итак, начинаю рассказ про действующее значение.



Пусть, когда мы кипятили воду с помощью постоянного тока при напряжении 100 В, как показано на этом рисунке, за 1 минуту температура воды поднялась на 1°C. Затем мы делали то же самое при переменном напряжении. Если при этом за 1 минуту температура воды поднимается на 1°C, то это означает, что действующее значение напряжения переменного тока равно 100 В. Смысл и метод расчёта действующего значения объяснены ниже. Внимательно прочитайте!



■ СМЫСЛ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ

Обозначим буквой W [Дж] тепловую энергию, выделяемую при действии переменного тока

Обозначим буквой I значение постоянного тока, под действием которого выделяется тепло, равное W

I = Действующее значение, $W = I^2 R T$

Поэтому мы будем рассматривать $I^2 R T$. Если разбить период T [с] на n малых временных отрезков:

$$\Delta t \left(= \frac{T}{n} \right),$$

то можно записать следующее:

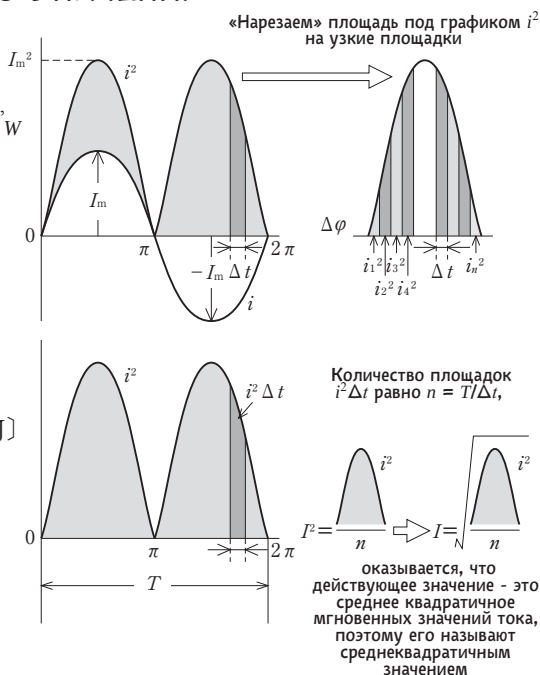
$$W = (i_1^2 \Delta t + i_2^2 \Delta t + i_3^2 \Delta t + \dots + i_n^2 \Delta t) R [J]$$

$$I^2 R T = (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + \dots + i_n^2) \Delta t \cdot R$$

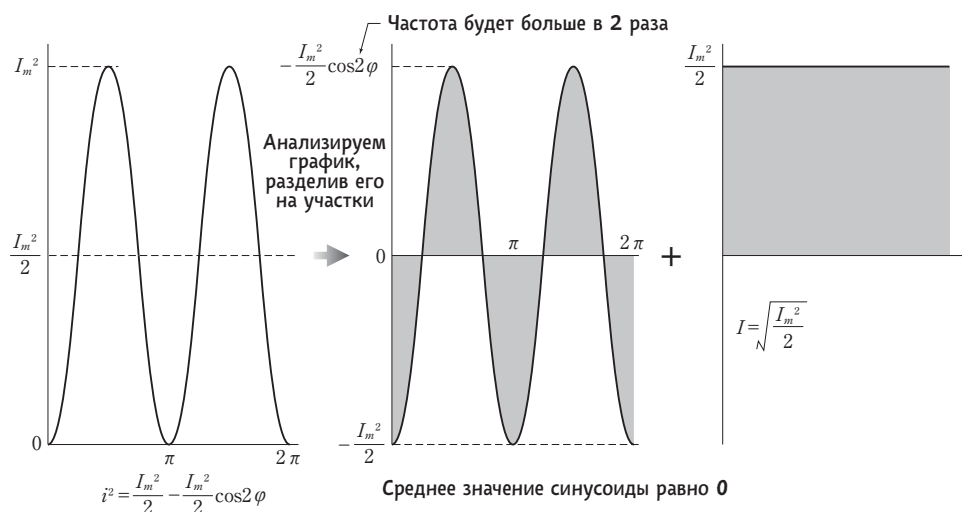
$$= \frac{(i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + \dots + i_n^2) T R}{n}$$

$$I = \sqrt{\frac{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + \dots + i_n^2}{n}}$$

$$= \sqrt{\frac{i^2}{n}}$$



■ РАСЧЁТ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ



Заменяем ωt на φ в выражении $I = I_m \sin \omega t$ и получаем $I_m^2 \sin^2 \varphi$

Анализируя график, можно увидеть, что:

$$\sin^2 \varphi = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\varphi) = \frac{1}{2} - \frac{\cos 2\varphi}{2}$$

Следовательно

$$\begin{aligned} i^2 &= \frac{I_m^2}{2} - \frac{I_m^2}{2} \cos 2\varphi \\ &= I_m^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos 2\varphi) \end{aligned}$$

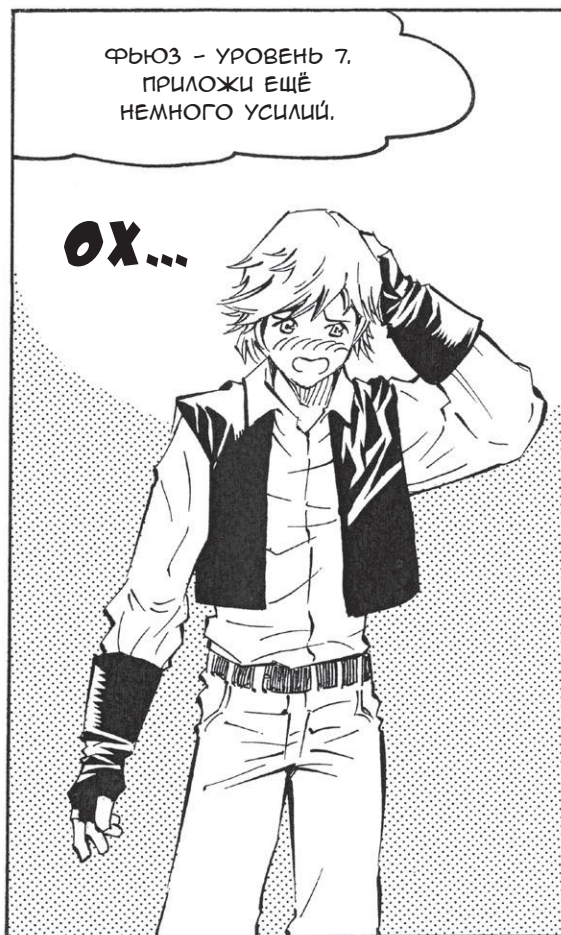
Так как второй член представляет собой синусоиду, его среднее значение за один период равно 0. Поэтому останется только первый член. Взяв от него квадратный корень, получим действующее значение:

$$I = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \text{ [A]}$$

■ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ

Формально определение действующего значения записывается так:

«Действующее значение – это квадратный корень из среднего арифметического всех квадратов мгновенных значений, которые переменный ток принимает в течение одного периода»





ЛЕКЦИЯ МАСТЕРА ЁТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СИЛЫ (Э)

ВЕКТОРЫ И КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА



Итак, сегодня мы изучим векторы!



Эх...



Во-первых, что такое вектор? Векторные величины используют, когда нужно выразить не только величину движения, но и его направление, например, направление электрического тока. Напротив, скалярными называют величины, выражающие только величину движения, например, температуру или время.



Векторная величина



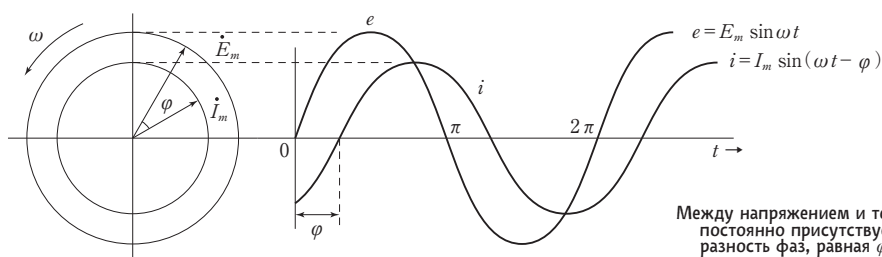
Скалярная величина



А что насчёт электричества?



Переменное напряжение и переменный ток — это векторные величины. Ведь у них изменяется не только величина, но и направление. На рисунках ниже вращающиеся векторы тока и напряжения представлены в виде стационарных векторов. Если вращать стационарный вектор с угловой частотой ω , то получится вращающийся вектор. При расчётах цепей переменного тока, например, при расчёте мощности, обычно используют стационарные векторы. Если подключить к цепи переменного тока конденсатор или катушку индуктивности, то в направлениях напряжения и тока появится различие. Такое различие в угле поворота векторов называют разностью (сдвигом) фаз



Между напряжением и током постоянно присутствует разность фаз, равная φ .

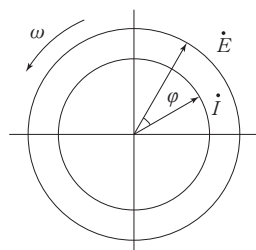
Хиудзу, твоя очередь!

Ох, как я голоден! Хиудзу, как поешь, подмени меня. Итак, за еду!

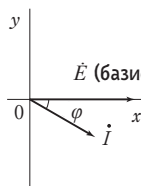
*У нас эта разность фаз обозначается как φ — угол запаздывания тока относительно напряжения (прим. перев.).



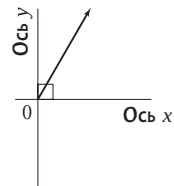
Хиудзу-сан, может быть, сначала поедим?



Вращающийся вектор
(рассматриваем
частоту вращения ω)



Стационарные векторы
(рассматриваем только
взаимосвязь $\dot{E}$ и I)

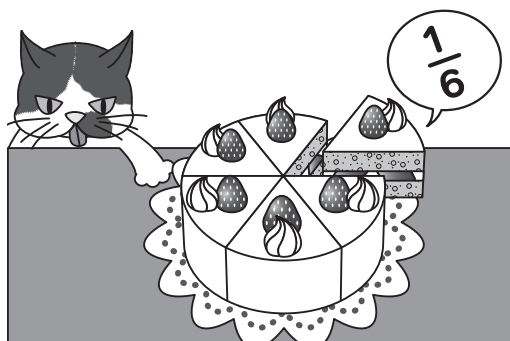


Прямоугольная
система координат



Нет! Продолжим, пусть даже во время еды!

Вы оба поняли, что такое векторные диаграммы, не так ли? Теперь мы будем изучать, как можно выразить эти векторные диаграммы при помощи формул. Обычно для выражения, например, массы тел или их количества мы пользуемся действительными числами, не так ли? Например, дробные числа, которыми нельзя выразить число людей, оказываются полезны при нарезании торта, а отрицательные числа, которыми нельзя выразить длину предметов, оказываются незаменимы для выражения долгов. Таким же образом, в электродинамике, электронике, и конечно же, в электротехнике для описания переменного тока необходимо использовать мнимые числа. Вы, конечно, знаете, что такое мнимые числа.



Это такие странные числа, квадрат которых равен отрицательному числу. Есть такая мнимая единица i , для которой $i^2 = -1$.



Да. И законы теории электрических цепей выполняются в мире комплексных чисел, содержащем мнимые числа. Однако, в электротехнике буквой i принято обозначать ток, поэтому мнимую единицу обозначают буквой j . Кроме того, вам полезно будет запомнить следующее.



Мнимая единица в четвёртой степени равна целому числу 1. А если умножить на j ещё раз, то на векторной диаграмме произойдёт поворот вектора на 90° против хода часовой стрелки.

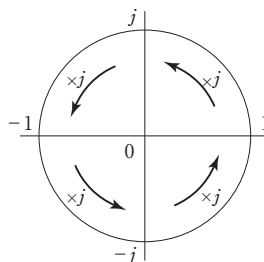
$$j = \sqrt{-1}$$

$$j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$$

$$j^3 = j^2 \times j = -1 \times \sqrt{-1} = -j$$

$$j^4 = j^2 \times j^2 = (-1) \times (-1) = 1$$

И в заключение изучим формулу Эйлера.



Каждый раз при умножении целого числа 1 на мнимое число j происходит поворот вектора тока на 90° против хода часовой стрелки



Что-то одна математика. И на теорию электрических цепей это не похоже, в школе мы это ещё не проходили.



Космо, ты ещё школьница?



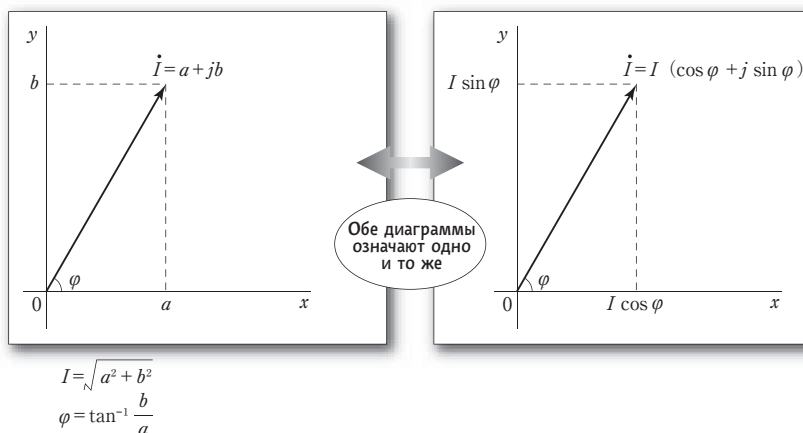
Да, я недавно поступила в старшую школу. А Фьюз – выпускник старшей школы. Сейчас он подрабатывает, охотясь на детали, пока не начались занятия в ВУЗе. А я инспектор – слежу, чтобы он ничего не нарушал.



В старшей школе тебе тоже предстоит изучать формулу Эйлера. Поэтому это тебе в любом случае пригодится.



Давайте я объясню. Ведь я – самый учёный из вас всех. Для начала взгляните на эти диаграммы.





Как ясно из правой диаграммы на предыдущей странице, составляющие $\vec{I}$ по осям X и Y можно выразить так:

X -составляющая: $a = I \cos \varphi$

Y -составляющая: $b = I \sin \varphi$

Это можно записать так:

$$\vec{I} = a + jb = I \cos \varphi + j I \sin \varphi$$

И здесь появляется формула Эйлера:

$$\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi}$$

Здесь буква e^* — это основание натурального логарифма, $e = 2.71828$

В общем, ток I можно записать как:

$$\vec{I} = I e^{j\varphi}$$

Эта формула Эйлера позволяет, пользуясь правилом умножения степеней с одинаковыми основаниями, рассчитывать разность фаз путём простого вычитания показателей степеней. То есть, мы можем записать так:

$$e^{j\varphi_1} \times e^{j\varphi_2} = e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

$I e^{j\varphi}$ — это вектор длиной I , у которого угол опережения оси абсцисс по фазе равен углу φ . Угол φ называют ещё аргументом комплексного числа. Случай запаздывания тока по фазе выражается так:

$$I e^{-j\varphi} = I \angle -\varphi.$$

Это полярная форма записи комплекса тока. Ну что, оба поняли?



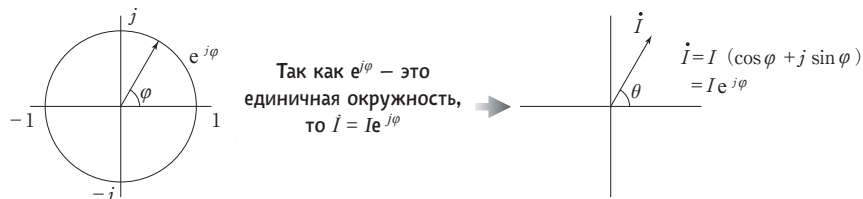
Да...



Ну, всё это является инструментарием, необходимым для понимания электрических цепей. Поэтому рано или поздно вам придётся овладеть этим. Я напишу вам шпаргалку, заглядывайте в неё от случая к случаю.

■ КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЕКТОРАХ И КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЛАХ

Формула Эйлера



Используя эту формулу Эйлера, выражаем вектор $\dot{I}$ в виде

$$\dot{I} = I e^{j\varphi}.$$

В более простом виде это можно записать так:

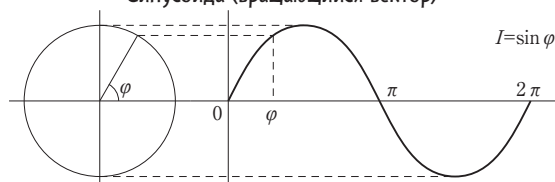
$$\dot{I} = I e^{j\varphi} = I \angle \varphi$$

Далее, используя тригонометрические функции и теорему Пифагора, можно записать следующие отношения:

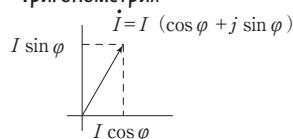
$$I = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

ТРИГОНОМЕТРИЯ, КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА, ПОЛЯРНЫЕ КООРДИНАТЫ

Синусоида (вращающийся вектор)

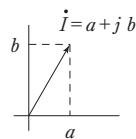


• Тригонометрия



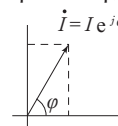
Тригонометрию все изучают долго, начиная с младшей школы, поэтому это — самое понятное. Векторы и тригонометрия имеют много общего.

• Комплексные числа



Если вы сильны в арифметике, то разберётесь с ними так же легко, как с алгебраическими выражениями. Наиболее полезны они при расчёте сложных электрических цепей.

• Полярные координаты

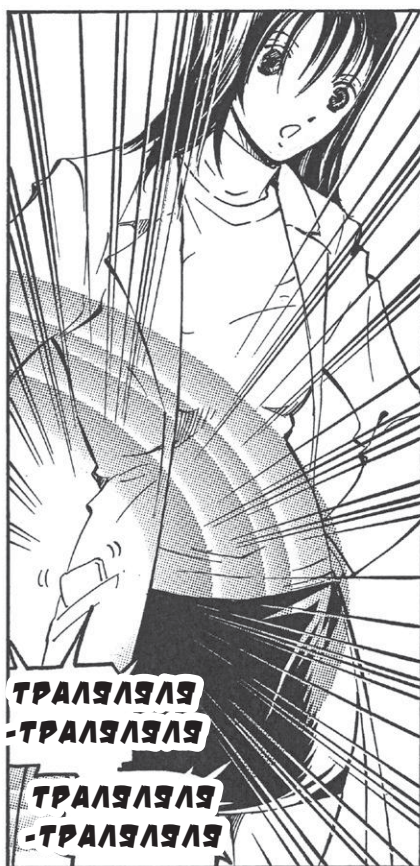


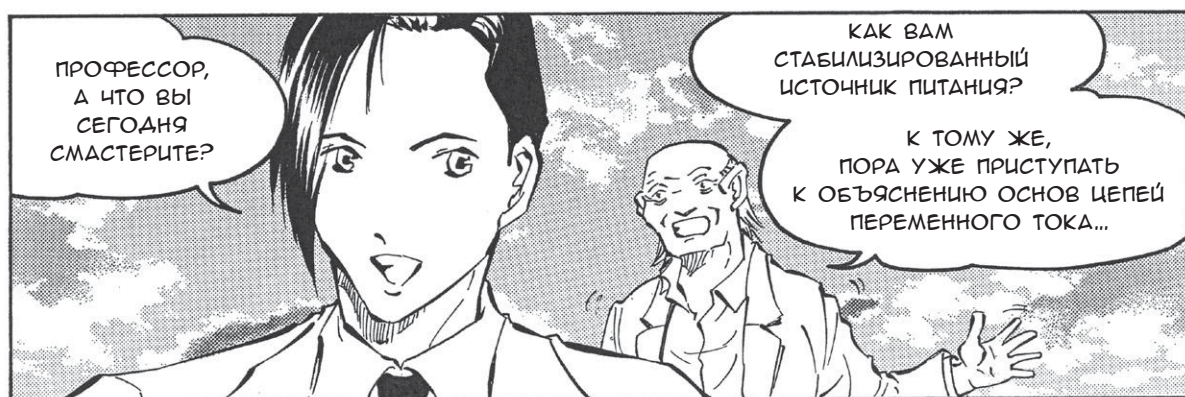
С помощью полярных координат можно быстро находить разность фаз. Очень удобны при расчёте цепей, в которых между электрическими величинами есть разности фаз.

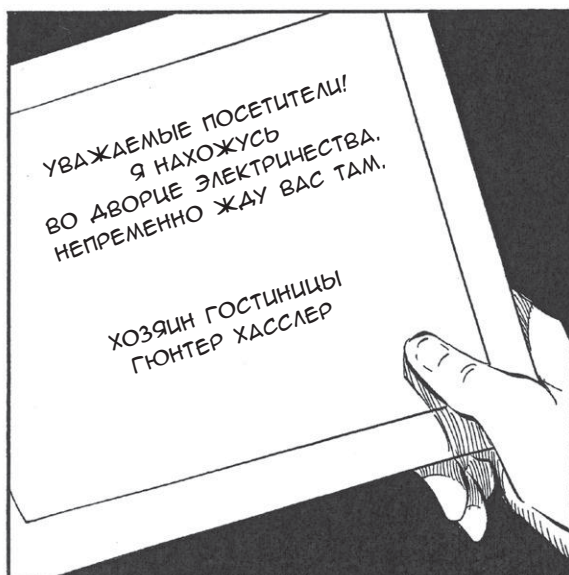


ЕСЛИ НУЖНО ТОЛЬКО ПРОВЕСТИ РАСЧЁТЫ, ТО УДОБНЕЕ ПОЛЬЗОВАТЬСЯ СТАЦИОНАРНЫМИ ВЕКТОРАМИ. НО ЛУЧШЕ ВСЕГО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ТОТ МЕТОД РАСЧЁТА, КОТОРЫЙ НАИБОЛЕЕ ПОДХОДИТ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧЕ.

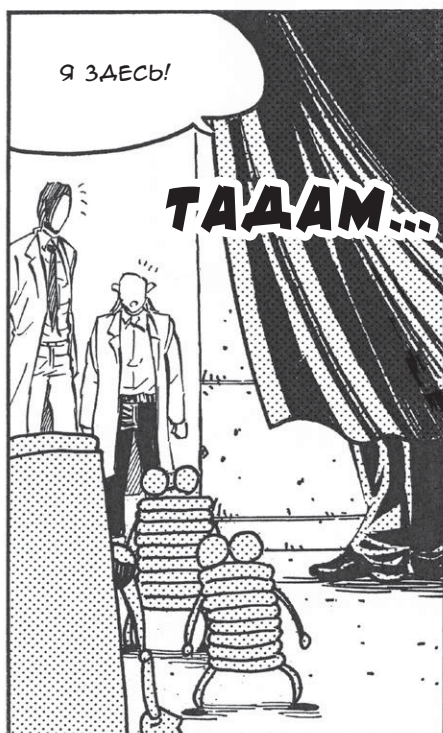
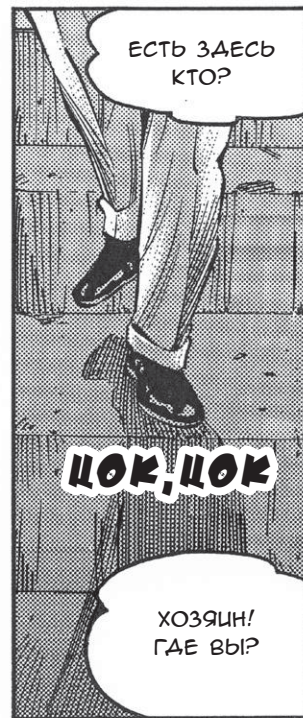
4. ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПОЛНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ





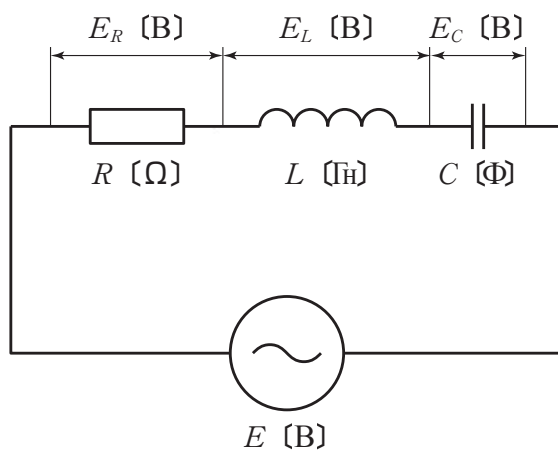






НАЙДИТЕ КАЖДОЕ
ИЗ НАПРЯЖЕНИЙ E_R , E_L и E_C
В СЛЕДУЮЩЕЙ ЦЕПИ.

НАЙДИТЕ ТАКЖЕ ПОЛНОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ДАННОЙ ЦЕПИ.



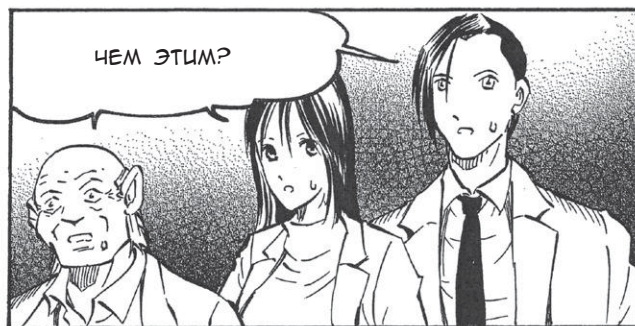
И ЕЩЁ, ПУСТЬ
НА ЭТОТ ВОПРОС
ОТВЕТАТ ДВОЕ
МОЛОДЫХ
ДРУЗЕЙ.

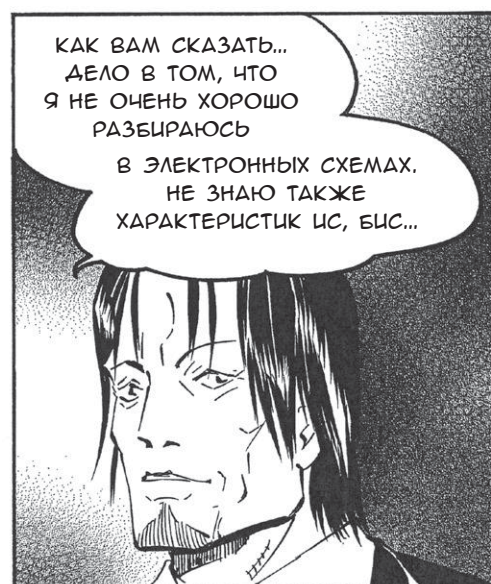
ВЕДЬ МНЕ КАЖЕТСЯ,
ЧТО ОСТАЛЬНЫЕ ЛЮДИ -
НЕ МЕСТНЫЕ.

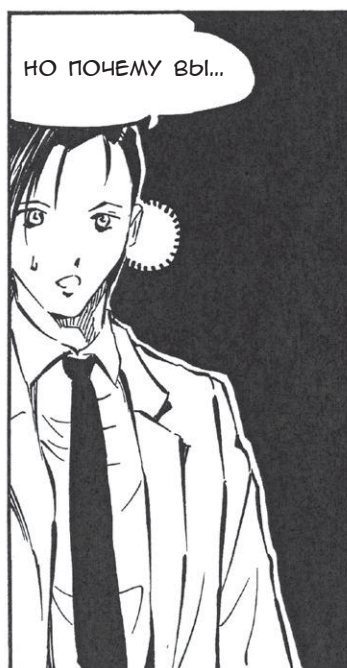
ПУСТЬ ИСТОЧНИК
ПИТАНИЯ ИМЕЕТ
НАПРЯЖЕНИЕ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
100 В.











НО ПОЧЕМУ ВЫ...



АХ, ЭТО ВСЁ, ЧТО Я МОГУ
ВАМ СКАЗАТЬ.
КАК БЫ ТАМ НИ БЫЛО,
ЭТО - ОПАСНАЯ ШТУКА.
ВЕДЬ ЭТО ТАКАЯ ЭНЕРГИЯ,
КОТОРАЯ МОЖЕТ ДАЖЕ
ВЫЗВАТЬ БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ,
ЕСЛИ ЕЁ НАКОПИТСЯ
МНОГО.

ПО СРАВНЕНИЮ
С ЭТИМ
БЕСЧИНСТВА
ДЕТАЛЕЙ
ПОКАЖУТСЯ
ВАМ ДЕТСКИМИ.



ЭТО МЕНЯ
НЕ ВОЛНУЕТ!
ОТКУДА
ТЫ ЗНАЕШЬ
О МОЕЙ
ЖЕНЕ?



ВОТ ТЕБЕ НА!
ЗНАЧИТ, НАМ
ПРИДЁТСЯ ИДТИ
ДАЛЬШЕ?

А МНЕ КАЗАЛОСЬ,
ЧТО МЫ НАЙДЕМ
ЕЁ ЗДЕСЬ...

ох

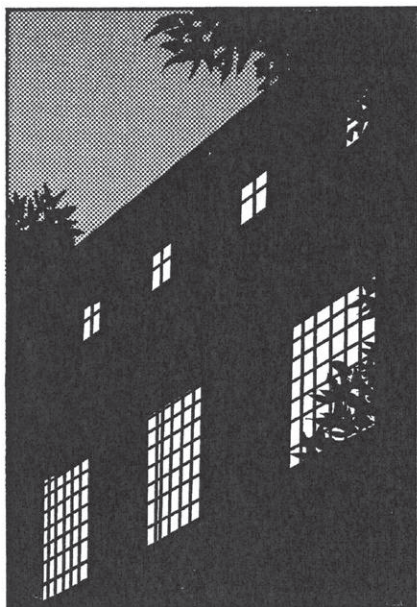
хха



ПРИМЕРНО НЕДЕЛЮ НАЗАД
Я ВИДЕЛ, КАК БИС НЕСЛИ
ЕЁ НА СВОИХ СПИНАХ.

ДУМАЮ, ЧТО ГДЕ-НИБУДЬ
В ГОРОДЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ИЛИ
В ГОРОДЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ
ЕЁ ПОХИТИЛИ ИЗ ГОСТИНИЦЫ,
КОГДА ХОЗЯИН НЕНАДОЛГО
ОТЛУЧИЛСЯ.





■ ИНДУКТИВНОСТЬ



Там к источнику питания переменного тока была подключена катушка индуктивности, не так ли? Она обладает индуктивностью (самоиндуктивностью), поэтому при изменении тока в ней возникает ЭДС, мешающая этому изменению. К тому же, в цепь был подключен конденсатор, и когда напряжение начинает изменяться, в нём возникает ток, направленный противоположно этому изменению. От всего этого голова идёт кругом...



А ты, оказывается, ещё размышлял... А я просто стояла, а когда ты упал, тоже приворилась...



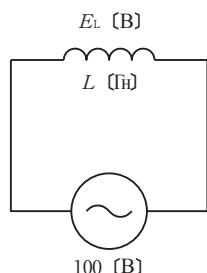
Ах ты хитрованка...



Итак, давайте изучим свойства катушки индуктивности и конденсатора в цепи переменного тока. Если в схеме есть только один элемент, то метод рассмотрения будет таким же, как для цепи постоянного тока.

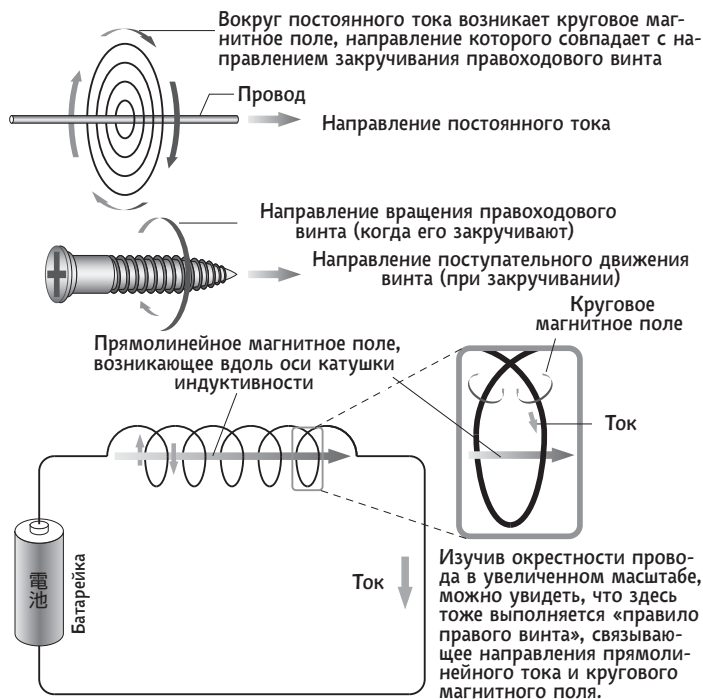
Начнём мы с цепи переменного тока, в которой содержится катушка индуктивности. Про свойства катушки, вы, похоже, уже знаете, поэтому давайте посмотрим, как она будет вести себя в цепи переменного тока. Сначала расскажу вам про индуктивное сопротивление.

Упростим предыдущую задачу – вот замкнутая цепь, содержащая только катушку.



Вы знаете, что согласно «правилу правого винта» Ампера при пропускании тока через провод возникает магнитное поле, направление которого определяют с помощью «правила правого винта» Ампера. В случае катушки индуктивности магнитное поле тоже возникает. Магнитное и электрическое поля появляются вместе. Там, где есть электрический ток, есть и магнитное поле. И наоборот.

Правило правого винта



Вы, наверное, знаете, что такое электромагнитная волна. Это явление, при котором электрическое и магнитное поля возникают, сменяя друг друга. Поэтому когда изменяется ток, магнитное поле тоже изменяется.



Изменение магнитного поля – это то же самое, что движение проводника внутри неподвижного магнитного поля. При этом в проводнике возникнет ЭДС индукции, направленная так, чтобы препятствовать изменению магнитного поля. Это самоиндукция. Она описывается следующей формулой, называемой законом электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла:

$$e = N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} [\text{В}].$$

Для оценки величины самоиндукции надо знать, какая ЭДС возникает в катушке, когда изменяется ток. Другими словами, если при изменении тока на 1 А за 1 с появляется ЭДС 1 В, то величина самоиндукции равна 1 Гн (Генри). Эта величина называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки и обозначается буквой L .

$$\text{Магнитный поток } \Phi [\text{Вб}] = L [\text{Гн}] I [\text{А}]$$

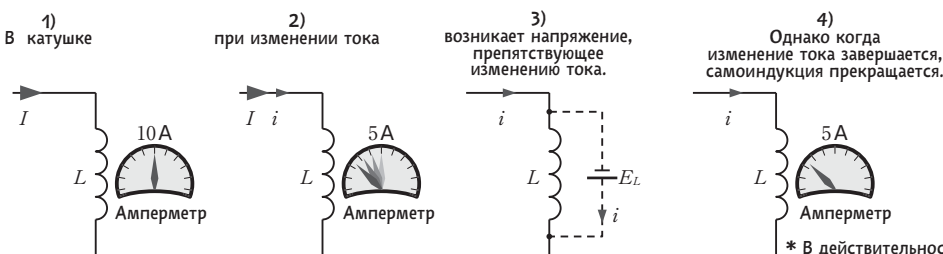
Другими словами, магнитный поток Φ пропорционален току I , а собственная индуктивность L – это соответствующий коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и электрическим током I . С учётом числа витков катушки формула выглядит так:

$$\text{Магнитный поток } \Phi [\text{Вб}] = w [\text{Число витков}] L [\text{Гн}] I [\text{А}].$$

Поэтому в катушке, подключённой к источнику переменного тока, возникает ЭДС, которая препятствует изменению тока этого источника. Это явление называют электромагнитной индукцией.



Может быть, индуктивность можно рассматривать как сопротивление?



Верно. Однако это ещё не всё. Момент достижения током максимального значения является переломным моментом, когда заканчивается увеличение тока и начинается его уменьшение. Другими словами, в этот момент ток не изменяется, поэтому ЭДС катушки равна 0. Далее, когда синусоидальный ток равен 0, тогда ток изменяется с максимальной скоростью, ЭДС катушки также достигает максимального значения. Это показано в виде графиков на следующей странице. Ну как? Не правда ли, хорошо видно, что ток запаздывает от напряжения по фазе на $\pi/2$?

ЭДС, которая возникает при этом в катушке, находится по следующей формуле. Здесь t означает время.

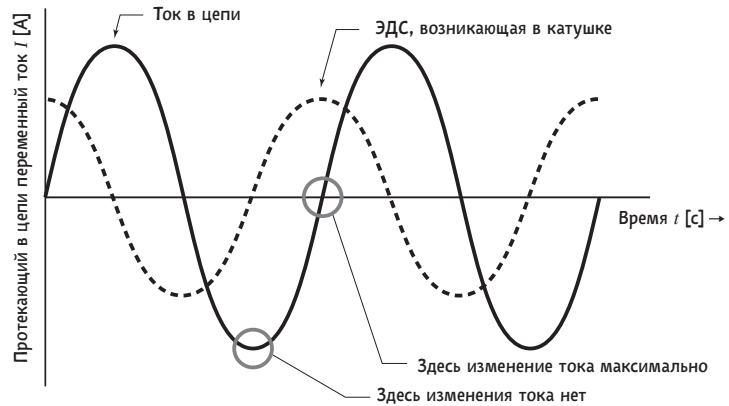
$$E_L = L \times \frac{\Delta i}{\Delta t}$$



$\Delta i / \Delta t$ – это производная? Мы её ещё не изучали.



Ничего! Ведь Фьюз всё как следует запомнит.



■ ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ



Как только что заметила Космо, катушку индуктивности в цепи переменного тока можно рассматривать как элемент, обладающий каким-то сопротивлением. Давайте посмотрим, каков будет ток в цепи при подключении к катушке синусоидального напряжения E .



Если ток i изменяется с течением времени t , то в катушке возникает ЭДС самоиндукции E_L .



Верно. Возникающая в катушке ЭДС выражается формулой:

$$E_L = L \times \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

то есть E_L будет пропорциональна скорости изменения тока, рассчитанной для малого промежутка времени:

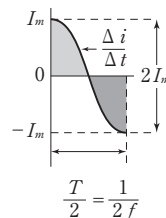
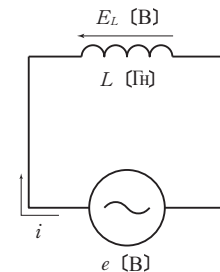
$$\frac{\Delta i}{\Delta t},$$

Посмотрите на этот график. За половину периода ток изменяется от максимального значения I_m до минимального $-I_m$. Поэтому величина изменения будет равна

$$I_m - (-I_m) = 2I_m.$$

Половина периода равна $1/(2f)$, поэтому среднее изменение тока за секунду:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{2I_m}{1/(2f)} = 4fI_m.$$



1) Средняя скорость изменения тока [A/c] = Изменение тока/Полпериода =

$$= \frac{2I_m}{\frac{1}{2f}} = 4fI_m = \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

2) Ср. значение ЭДС самоиндукции:

$$E_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 4fLI_m$$

Ср. значение напряжения $E_{ср} = \frac{2}{\pi} E_m$

Ср. значение ЭДС самоиндукции $E_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 4fLI_m$

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{\pi} E_m &= 4fLI_m \\ E_m &= 2\pi fLI_m \\ &= \omega LI_m \\ &= X_L I_m \end{aligned} \right\}$$

$$\omega = 2\pi f \quad X_L = \omega L = \text{индуктивное сопротивление}$$



Далее, среднее значение напряжения $E_{\text{ср}}$:

$$E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_m,$$

поэтому, если обозначить через E_L среднее значение ЭДС самоиндукции для L , то получим:

$$E_L = \frac{2 E_m}{\pi} = L \times \frac{\Delta i}{\Delta t} = 4fLI_m,$$

$$E_m = 2\pi fLI_m.$$

Теперь рассмотрим действующие значения. Действующее значение напряжения обозначим через E , а действующее значение тока – через I . Так как действующее значение ЭДС в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального значения E_m , то будем иметь:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi fLI_m}{\sqrt{2}} = 2\pi fLI.$$

Здесь $2\pi f$ – это угловая частота ω , то есть:

$$E = \omega LI.$$

Далее, обозначив ωL как X_L , перепишем выражение так:

$$E = X_L I.$$

Это $X_L = \omega L$ называют индуктивным сопротивлением, а его единица измерения – Ом, то есть такая же, как у активного сопротивления R . В виде векторов в комплексной плоскости:

$$\dot{E} = jX_L \dot{I} = j\omega L \dot{I}.$$

Множитель j перед током показывает, что ЭДС опережает по фазе ток ровно на $\pi/2$.

■ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ



Следующим будет конденсатор. Фьюз, можешь назвать свойства конденсатора?



Самое главное свойство – это способность накапливать электрический заряд, не так ли?



Верно. Устройство конденсатора показано на рисунке справа. Если конденсатор подключён к источнику постоянного тока, то ток прекращается, когда напряжение на обкладках конденсатора сравняется с напряжением источника. Однако в случае источника переменного тока, положительные и отрицательные заряды меняются друг с другом местами, и ток протекает. Разумеется, обмена электронами между обкладками конденсатора не происходит. Электрический заряд, который при этом накапливается в конденсаторе, обозначают q [Кл (кулон)]. Этот заряд и разность потенциалов E между выводами конденсатора связаны между собой следующим соотношением:

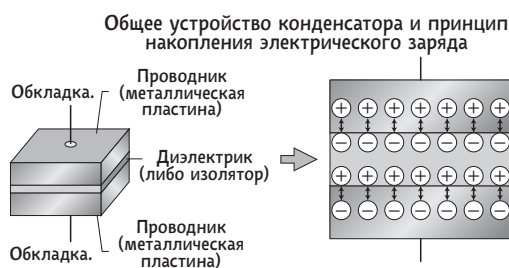
$$q \text{ [Кл]} = CE.$$

Коэффициент пропорциональности в этой формуле, обозначаемый буквой C , выражает электрическую ёмкость. Её единицей измерения является [Ф (фарад)].

При изменении напряжения в конденсаторе возникает ёмкостной ток i_C , препятствующий этому изменению. Он выражается следующей формулой:

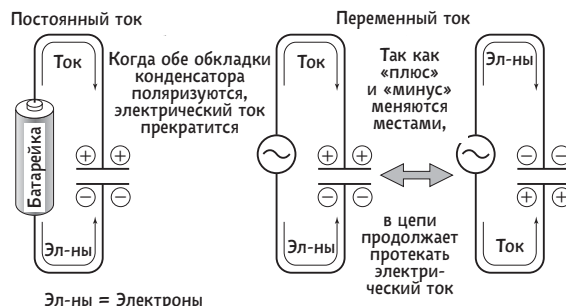
$$i_C = C \times \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Другими словами, конденсатор C создаёт ток, пропорциональный изменению напряжения на его выводах и препятствующий этому изменению.



Если между обкладками конденсатора приложить напряжение, то внутри диэлектрика, зажатого между обкладками, произойдёт поляризация, которая будет помогать удерживать заряды, скопившиеся на проводниках.

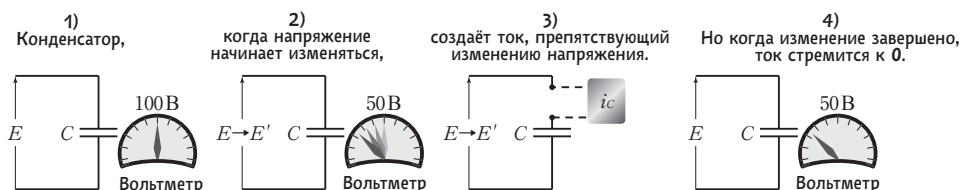
Конденсатор и электрический ток



■ ЁМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ



Давайте всё-таки посмотрим, что будет происходить, если подключить конденсатор к источнику синусоидального тока. Рассмотрим случай, когда через конденсатор с ёмкостью C протекает синусоидальный ток i .



* В действительности, конденсатор накапливает внутри себя электрическую энергию и отдаёт её источнику при уменьшении напряжения

Конденсатор будет накапливать электрический заряд q . В формульном виде это выражается так:

$$q = CE = CE_m \sin \omega t$$

В случае переменного тока, значение q изменяется с течением времени. В конденсаторе создаётся ток i_C , препятствующий изменению напряжения на его выводах. Это описывается следующей формулой:

$$i_C = C \times \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

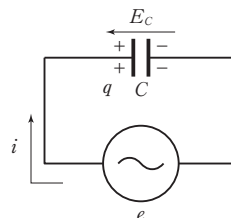
Здесь я хочу, чтобы вы вспомнили про индуктивное сопротивление, о котором я только что рассказывал. Как вы помните, ЭДС самоиндукции E_L выражается уравнением:

$$E_L = L \times \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Если в этом выражении заменить E_L на ток i_C , протекающий через конденсатор, а Δi заменить на Δq , то мы получим следующее. Вспомнив о том, что заряд $q = CE$, мы можем написать:

$$i = C \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

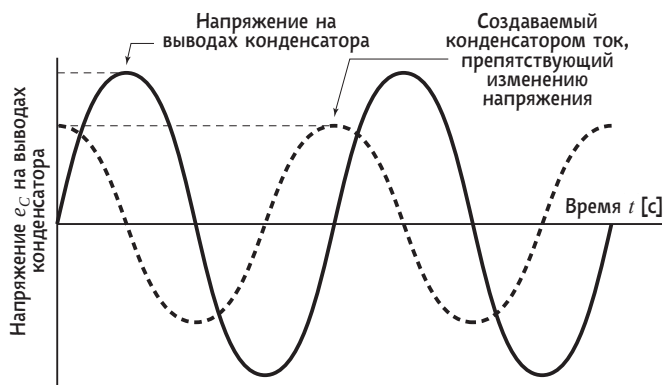
Это означает, что напряжение E_C на конденсаторе отстает от тока i_C по фазе на угол $\pi/2$, по аналогии с тем, как в уравнении ЭДС самоиндукции ток i_L отстает от напряжения E_L . Перефразируя, отметим, что ток i_C опережает по фазе напряжение E_C ровно на $\pi/2$. Таким образом, мы опять встретились с разностью фаз.



Опять производная?
А интегралы будут?



Но как и в случае с индуктивностью, разговор о ёмкости на этом не закончен. Давайте рассмотрим напряжение и ток в цепи с ёмкостью C .



В формульном виде это выглядит так:

$$\text{Напряжение } e = E_m \sin \omega t$$

$$\text{Ток } i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Давайте подумаем о напряжении и заряде в этой цепи. Взгляните на этот рисунок. Как помните, мы использовали половину периода, когда мы вычисляли среднюю скорость изменения тока в цепи с L , но в случае цепи с C начальные и конечные значения заряда q равны 0, поэтому рассмотрим $1/4$ периода. Так как $1/4$ периода равна $1/(4f)$, то среднее изменение заряда за секунду можно выразить так:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{CE_m}{1/(4f)} = 4fCE_m$$

Так как среднее значение $I_{\text{ср}}$ тока i равно $2I_m/\pi$, можно вывести следующее:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2I_m}{\pi} = C \frac{\Delta q}{\Delta t} = 4fCE_m$$

$$I_m = 2\pi fCE_m$$

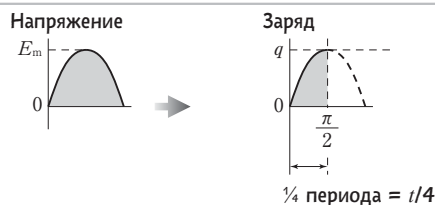
Вышесказанное я свёл в эту таблицу.

Далее, если в этой формуле заменить симальные значения на действующие:

$$I = 2\pi fCE = \omega CE = \frac{E}{X_C}$$

$$\omega C = \frac{1}{X_C}$$

$$\frac{1}{\omega C} = X_C$$



Угловая частота $\omega = 2\pi f$
Ёмкостное сопротивление $X_C = 1/(\omega C)$

Взаимосвязь изменения заряда и тока конденсатора

Время	$0 \sim \frac{\pi}{2}$
Величина изменения заряда	$0 \sim CE_m$
Среднее изменение заряда	$\frac{CE_m}{\frac{T}{4}} = 4fCE_m = I_a$
Среднее значение тока	$I_{\text{ср}} = \frac{2I_m}{\pi}$
Максимальное значение тока	$I_m = \frac{\pi}{2} I_{\text{ср}} = 2\pi fCE_m$
Действующее значение	$I = 2\pi fCE = \omega CE = \frac{E}{X_C}$

макс-

X_C называется ёмкостным сопротивлением. Оно, как и следовало ожидать, тоже выражается в омах. В виде векторов в комплексной плоскости это записывается так:

$$\vec{E} = -jX_C \vec{I} = -j \frac{1}{\omega C} \vec{I}$$

Множитель $-j$ перед током означает, что ток опережает по фазе напряжение ровно на $\pi/2$.



Что-то много здесь всяких сопротивлений...



Переходим к главному. Для цепи переменного тока привычная вам формула закона Ома немного изменяется:

$$E = IR \rightarrow \dot{E} = i\dot{Z}$$

Здесь $\dot{Z}$ называют комплексным (полным) сопротивлением, которое рассчитывается с учётом индуктивного и ёмкостного сопротивлений. Измеряется оно, конечно же, в омах. Ещё вам полезно будет запомнить одну удобную формулу. В ней используется комплексная (полная) проводимость $\dot{Y}$ – величина, обратная $\dot{Z}$. Вот эта формула:

$$\dot{Y} = 1/\dot{Z} = g + jb \text{ [См]}$$

Эта формула показывает, насколько легко будет протекать ток. Единицей измерения полной проводимости является [См], то есть сименс. В этом случае действительную часть g называют активной проводимостью, а мнимую часть b – реактивной проводимостью. Кроме того, в цепи переменного тока необходимо учитывать разность фаз, появляющуюся между напряжениями и токами под действием катушек индуктивности и конденсаторов.



Значит, сначала будут векторы, а интегралы потом?



...?

5. ВЕКТОРЫ И РАЗНОСТЬ ФАЗ

ЕСЛИ В ЦЕПИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

СОДЕРЖАТСЯ КАТУШКИ
И КОНДЕНСАТОРЫ,
ТО ПОЯВЛЯЕТСЯ
РАЗНОСТЬ ФАЗ.
ПОЭТОМУ БЕЗ ВЕКТОРОВ
ЗДЕСЬ НЕ ОБОЙТИСЬ.

АХ...

КАК ВЫ УЖЕ ПОНЯЛИ,
КОГДА В ЦЕПИ ЕСТЬ,
НАПРИМЕР L , ИЛИ C , МЕЖДУ
НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ
ВОЗНИКАЕТ РАЗНОСТЬ ФАЗ.

КРУТЬ

КРУТЬ

ПРАВДА?

СКРЯБ,
СКРЯБ

ТО ЕСТЬ ЭТО
ОЗНАЧАЕТ, ЧТО НУЖНО
ВЫЧИСЛЯТЬ СУММУ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ $\sin$
И СОСТАВЛЯЮЩЕЙ $\cos$.

А ЭТО БУДЕТ
НАГЛЯДНЕЕ, ЕСЛИ
ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ВЕКТОРЫ.



В этой цепи к источнику тока переменного тока последовательно подключены R и L . Посмотрите внимательно на векторную диаграмму. Давайте изучим её, приняв вектор тока за базисный вектор. Если ток равен i , то (так как фазы равны) напряжение e_R на сопротивлении R будет равно

$$e_R = Ri.$$

Напряжение e_L на индуктивности L опережает по фазе ток i на $\pi/2$, поэтому

$$e_L = j2\pi fLi.$$

Сумма этих двух напряжений будет равна

$$e = e_R + e_L = (R + j2\pi fL)i.$$

Заменяя ток на его комплексную амплитуду $\dot{I}$ ($I = I_m e^{j\varphi}$), а напряжение на $\dot{E}$, запишем в соответствии с законом Ома выражение

$$\dot{E} = \dot{Z}\dot{I}.$$

Здесь $\dot{Z}$ равно следующему:

$$\dot{Z} = R + j2\pi fL.$$

Можно сказать, что это сопротивление, содержащее также информацию о фазе. При этом:

$$\dot{E} = \dot{Z}\dot{I} = (R + j2\pi fL)\dot{I}.$$

Мы получили, что напряжение на сопротивлении R равно:

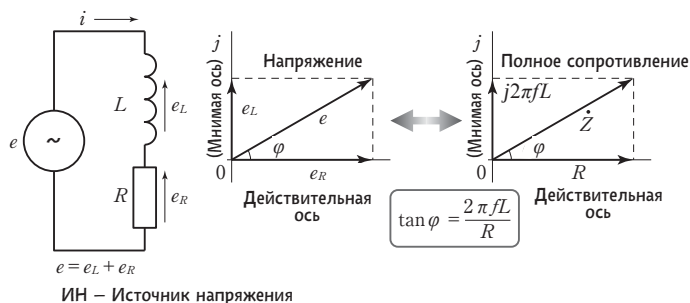
$$\dot{E}_R = R\dot{I},$$

а напряжение на индуктивности L :

$$\dot{E}_L = j2\pi fL\dot{I} = jX_L\dot{I}.$$

Как видите, если принять ток $\dot{I}$ за базисный вектор, то напряжение $\dot{E}_L$ будет опережать ток по фазе на угол $\pi/2$. Если принять фазу напряжения $\dot{E}$, которое равно сумме $\dot{E}_R$ и $\dot{E}_L$, за φ , то получится:

$$\tan \varphi = \frac{2\pi fL}{R}$$

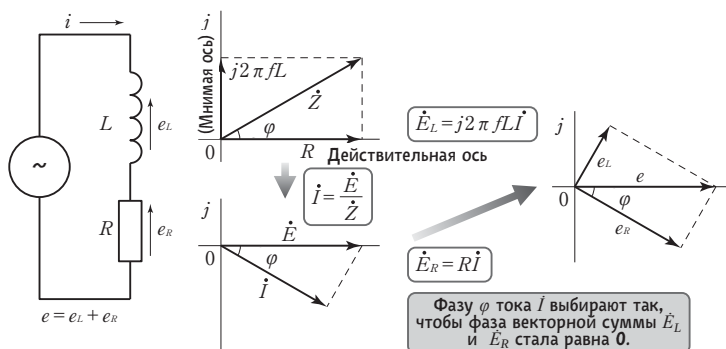




Теперь давайте попробуем принять напряжение за базисный вектор. В этом случае, опорной фазой будем считать фазу напряжения $\dot{E}$. При этом ток $\dot{I}$ будет равен:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{\dot{E}}{R - j \frac{1}{2\pi fC}}$$

$$= \frac{\left(R + j \frac{1}{2\pi fC}\right) \times \dot{E}}{\left(R - j \frac{1}{2\pi fC}\right) \left(R + j \frac{1}{2\pi fC}\right)}$$



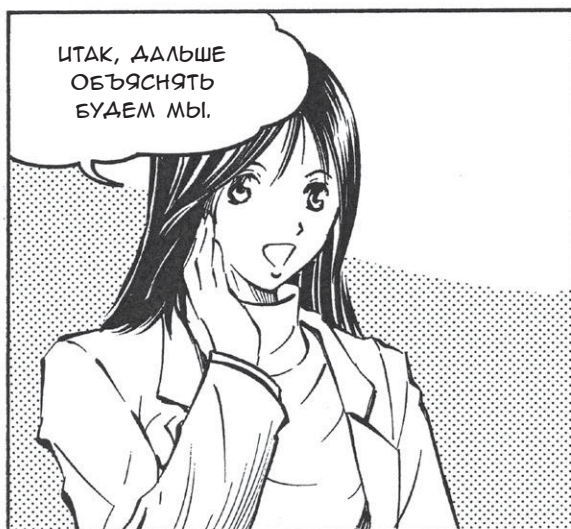
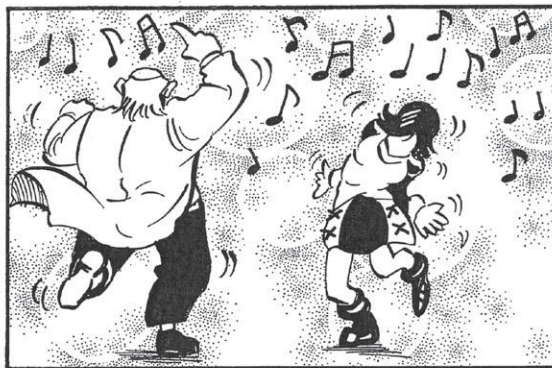
Другими словами, если сделать $\dot{E}$ опорным, то, приняв фазу $\dot{I}$ равной φ , получим:

$$\tan \varphi = -2\pi fL/R$$

Отсюда видно, что вектор тока $\dot{I}$ отстаёт по фазе от вектора напряжения $\dot{E}$ на угол φ . Величина тока находится так:

$$|\dot{I}| = \frac{\dot{E}}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} = \frac{\dot{E}}{|\dot{Z}|}$$

Итак, мы рассмотрели уравнения RL -цепи в векторной форме.

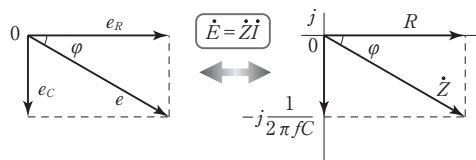
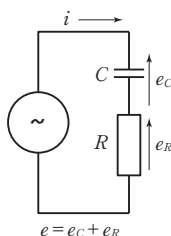




Посмотрите на этот рисунок. Полное сопротивление $\dot{Z}$ этой цепи равно следующему:

$$\dot{Z} = R + \frac{1}{j2\pi fC}$$

$$\left(= R - j \frac{1}{2\pi fC} \right)$$



Попробуем подключить к нему источник переменного тока. Тогда комплексное напряжение $\dot{E}$ и его абсолютное значение будут равны:

$$\dot{E} = \dot{Z} \dot{I} = \left(R - j \frac{1}{2\pi fC} \right) \dot{I}$$

$$|\dot{E}| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC} \right)^2} \dot{I} = |\dot{Z}| \dot{I}$$

Фаза φ вектора напряжения $\dot{E}$, возникающего на выводах RC-цепи:

$$\tan \varphi = - \frac{1}{2\pi fRC}$$

Отсюда видно, что вектор напряжения $\dot{E}$ отстаёт от вектора тока $\dot{I}$ на угол φ .



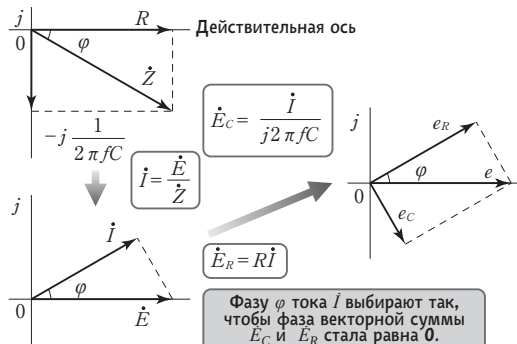
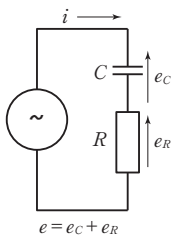
Теперь рассмотрим векторную диаграмму, где за базисный вектор принято комплексное напряжение $\dot{E}$.

Если принять фазу напряжения $\dot{E}$ за опорную фазу, то комплексный ток $\dot{I}$ будет равен следующему:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{\dot{E}}{R - j \frac{1}{2\pi fC}}$$

$$= \frac{(R + j \frac{1}{2\pi fC}) \times \dot{E}}{(R - j \frac{1}{2\pi fC})(R + j \frac{1}{2\pi fC})}$$

$$= \frac{R + j \left(\frac{1}{2\pi fC} \right)}{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC} \right)^2} \times \dot{E}$$



Если считать напряжение $\dot{E}$ базисным вектором, то для фазы φ тока $\dot{I}$ выполняется отношение

$$\tan \varphi = - \frac{1}{2\pi fRC}.$$

Видно, что вектор тока $\vec{I}$ опережает вектор напряжения $\vec{E}$ на угол φ . Кроме того, если обозначить $2\pi f = \omega$, то формула примет более простой вид.



Ну что Фьюз, в общих чертах понял?



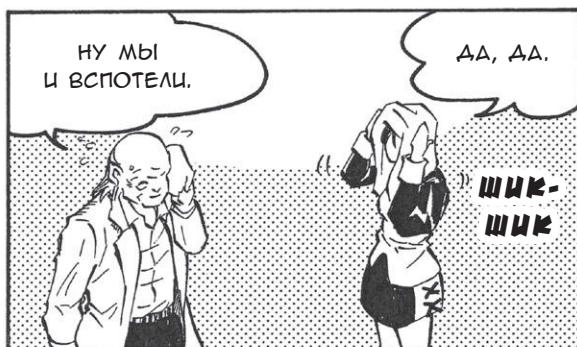
Ну... Я не уверен.



Не бойся! К этому надо просто привыкнуть!



Лучше бы я вместо этого потанцевал.



НА СЛЕДУЮЩИЙ ДЕНЬ....



Итак, наконец-то мы попробуем решить задачу, которую задал хозяин гостиницы. Теперь вам всё должно быть понятно. Пока не решите, завтракать не будем.



Не надо нас запугивать! Разве можно сражаться на пустой желудок?



Что ты говоришь! Ведь когда желудок полный, в сон будет клонить! Итак, попробуйте найти для данной цепи напряжения E_R , E_L и E_C , а также общее сопротивление Z .



Ох... как тяжело на голодный желудок. Для моего растущего организма...



Если хочешь есть, то реши это побыстрее. Ведь наша жизнь тоже от этого зависит.



Понятно. Так как это цепь с последовательным подключением, текущий в ней ток можно принять за $\dot{I}$. Приняв напряжения, возникающие на каждом из элементов цепи, за векторы $\dot{E}_R$, $\dot{E}_L$ и $\dot{E}_C$, а $2\pi f$ за ω , можно записать:

$$\dot{E} = \dot{E}_R + \dot{E}_L + \dot{E}_C = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j\omega L - j/(\omega C)]\dot{I} = \dot{Z}\dot{I}.$$

Тогда для $\dot{Z}$ можно записать следующее:

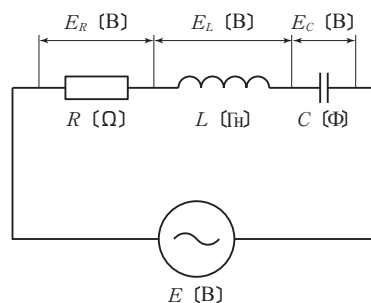
$$\dot{Z} = R + j\omega L - j/(\omega C) =$$

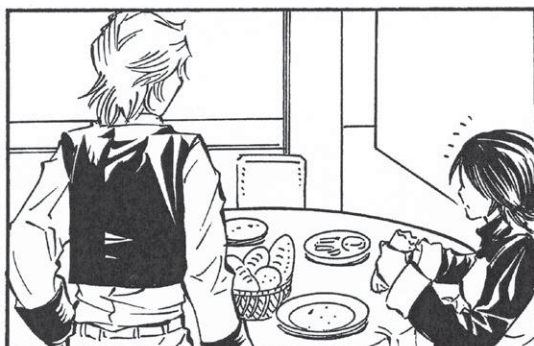
$$= R + j[\omega L - 1/(\omega C)].$$

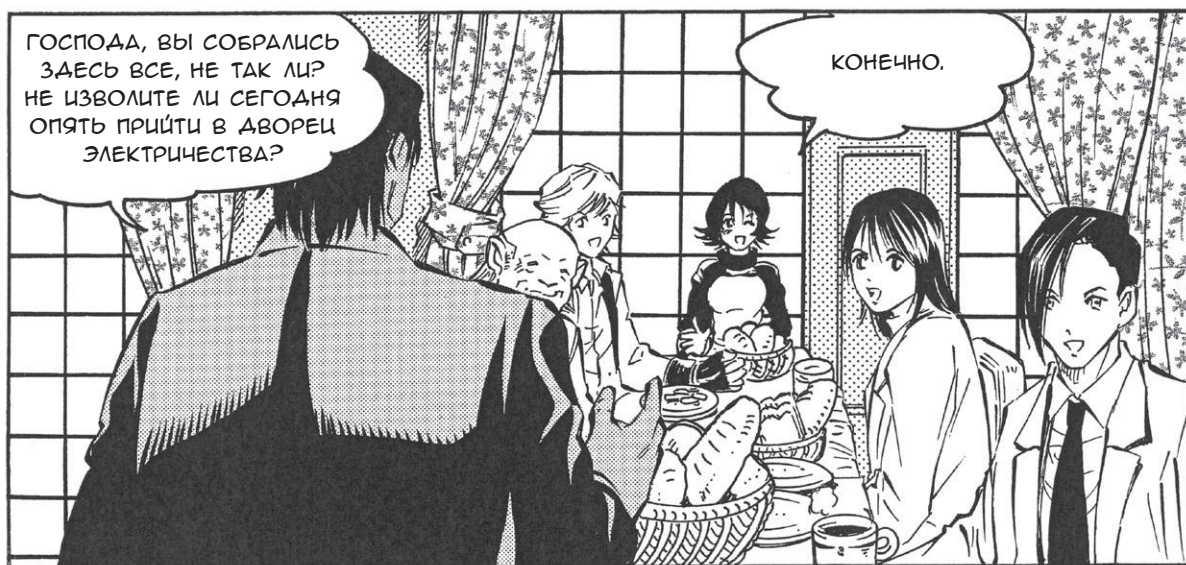
Ну что, правильно?

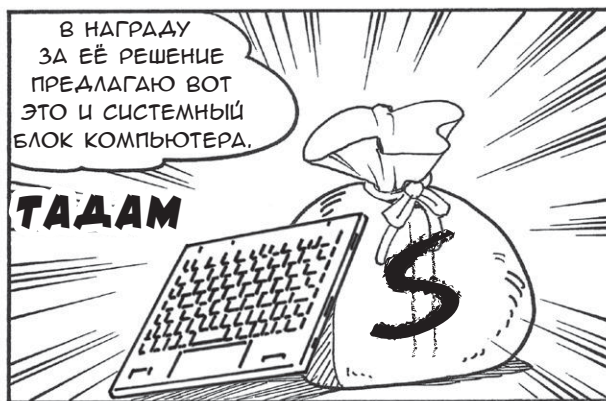


Да, неплохо. Ладно, пойдём завтракать!











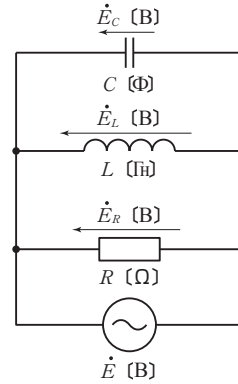
Значит, всё-таки параллельная цепь?



Не волнуйся. В параллельной цепи надо просто рассматривать токи.



Фьюз, метод расчёта параллельных цепей переменного тока почти такой же, как параллельных цепей постоянного. В этом случае более простые формулы получатся, если использовать не импеданс (полное сопротивление), а обратную ему величину адмиттанс (полную проводимость).



Найдите, пожалуйста, токи в элементах R , L и C этой цепи, общий ток, а также полное сопротивление. Если вы сможете решить эту задачу, то эти детали тоже успокоятся и вернуться на свои рабочие места.



А можно спросить? Можно ли представить $2\pi f$ как ω ?



Конечно, как Вам угодно.



Так, комплексное напряжение в этой цепи равно $\dot{E}$, токи каждой из ветвей, то есть $\dot{I}_R$, $\dot{I}_L$ и $\dot{I}_C$, будут равны, соответственно:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{E}}{R},$$

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{E}}{j\omega L} = -j \frac{\dot{E}}{\omega L},$$

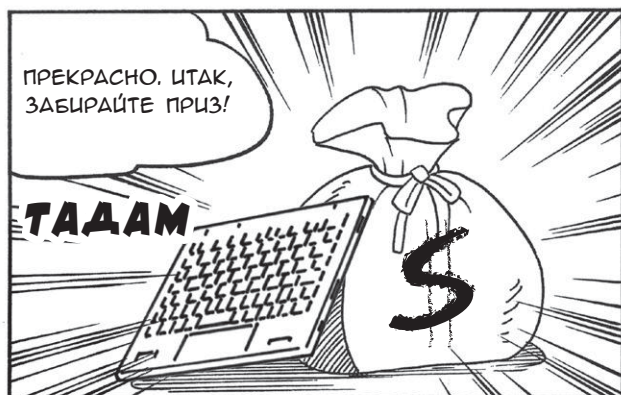
$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}}{-j/(\omega C)} = j\omega C \dot{E}.$$

Далее, общий ток находится как $\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C$, поэтому:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R} - j \frac{\dot{E}}{\omega L} + j\omega C \dot{E} = \left[\frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right] \dot{E}.$$

Полное сопротивление находится как $\dot{Z} = \dot{E}/\dot{I}$, поэтому:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}} = \frac{1}{\frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)} [\text{Ом}].$$





6. МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



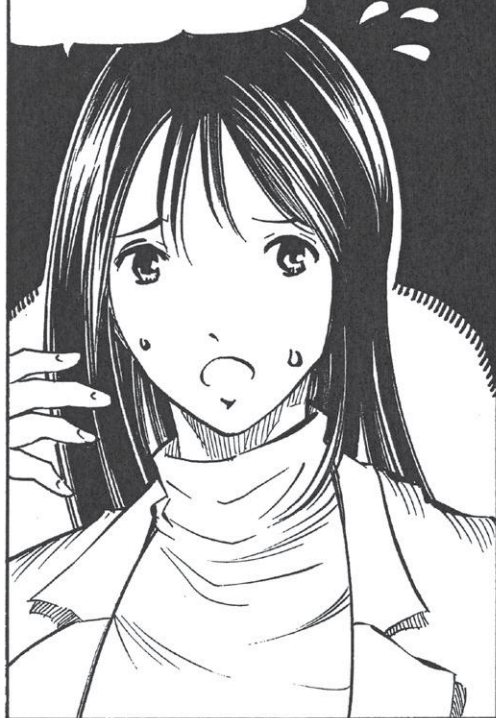
ФЬЮЗ, ЭТИХ ДЕНЕГ
МНЕ ХВАТИТ, ЧТОБЫ
ЗАКОНЧИТЬ СТАРШУЮ
ШКОЛУ.



Я РАДА ЗА ТЕБЯ!
МОЖЕТ БЫТЬ,
ЗАКОНЧИМ НА ЭТОМ
НАШЕ ПУТЕШЕСТВИЕ?



ПОДОЖДИ
НЕМНОГО.
У НАС ЕЩЁ ОСТАЛИСЬ
НЕРЕШЁННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ...



ОДНАКО,
ФЬЮЗ, МЫ ЕЩЁ
НЕ ЗАРАБОТАЛИ
ТЕБЕ НА 4 ГОДА
ИНСТИТУТА!

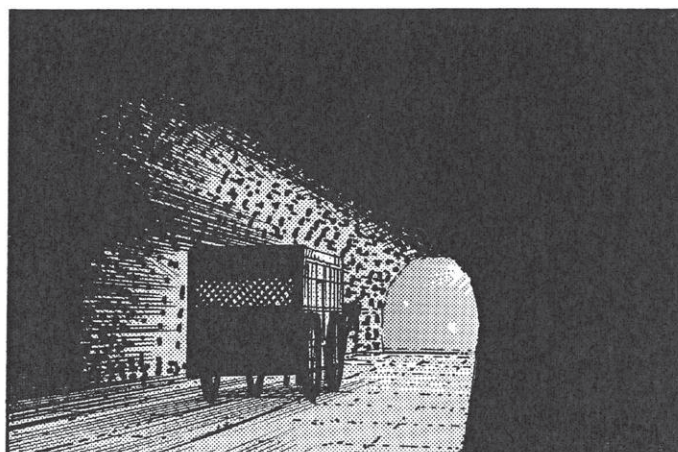


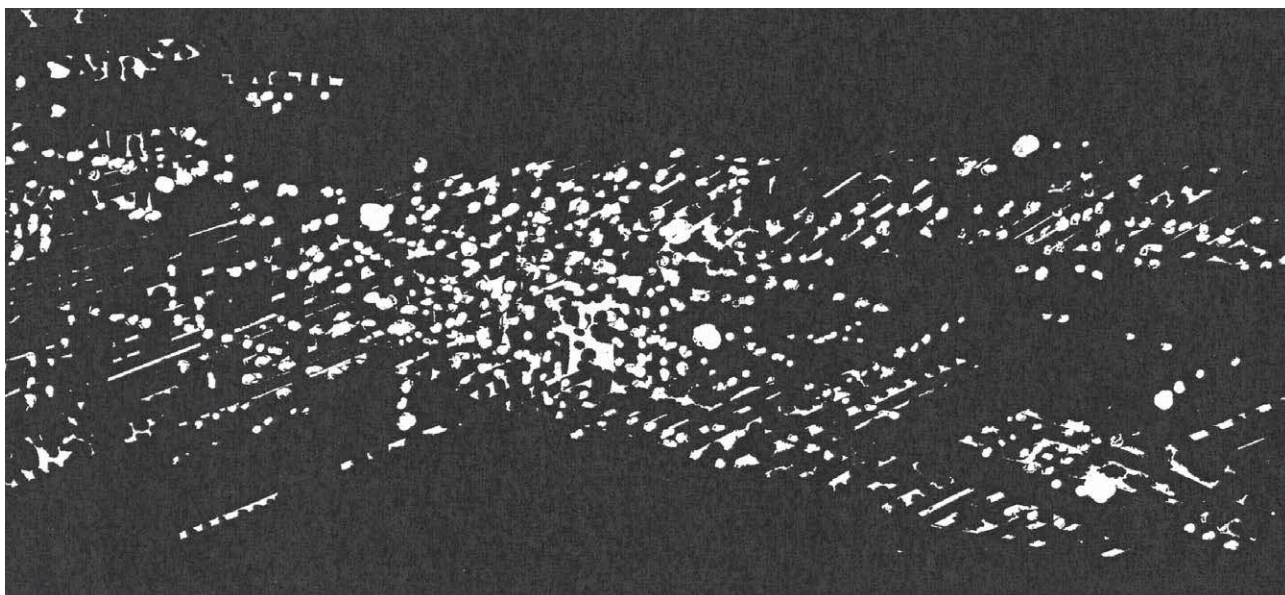
А ТАКЖЕ СТАРТОВЫЙ
КАПИТАЛ, ЧТОБЫ
ОТКРЫТЬ СВОЙ
МАГАЗИН. А ЕЩЁ –
РАСХОДЫ НА НАШУ
СВАДЬБУ. ТАК ЧТО
НЕ РАССЛАБЛЯЙСЯ.

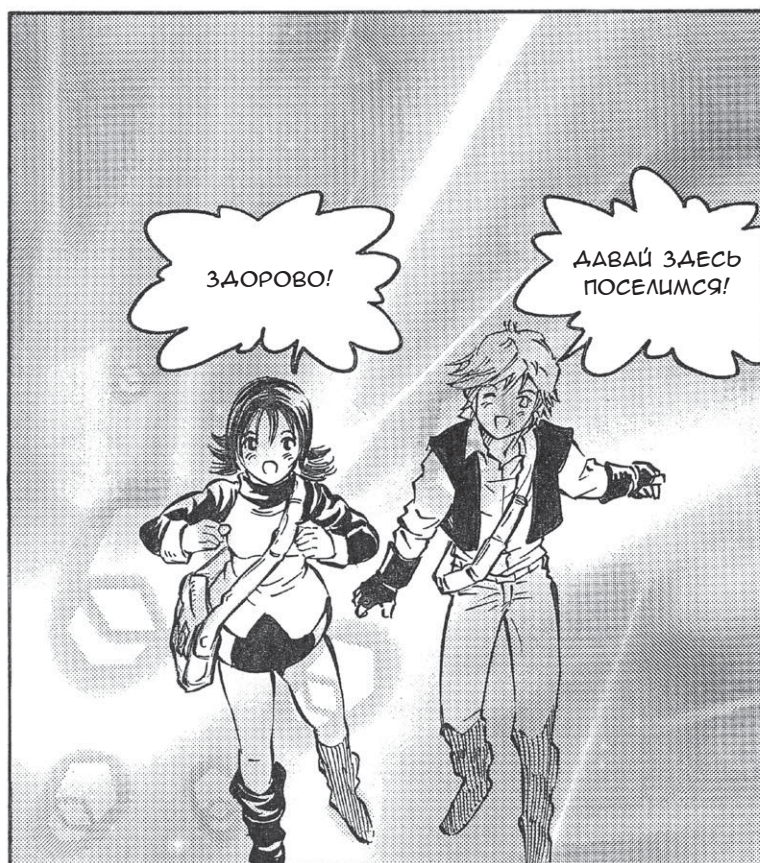
ЭХ, ТЫ ХОЧЕШЬ СКАЗАТЬ,
ЧТО ДЕНЕГ ЕЩЁ
СЛИШКОМ МАЛО?

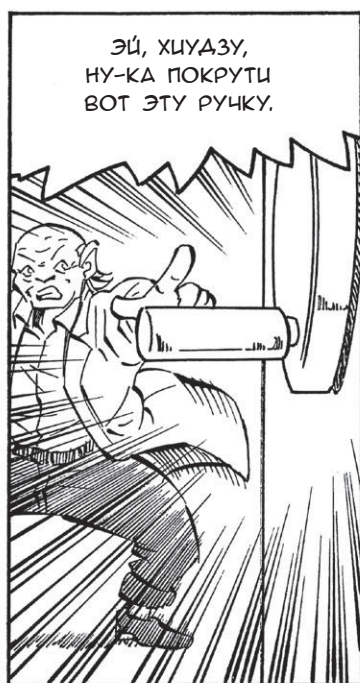
А Я ВЕДЬ ДЕЛАЮ
ВСЁ, ЧТО МОГУ...

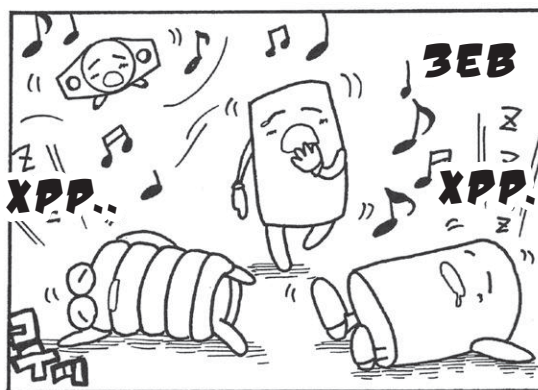
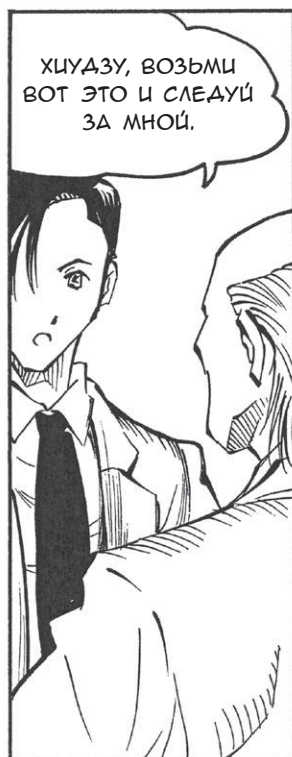
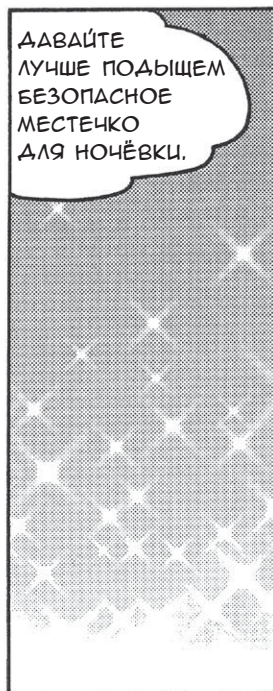


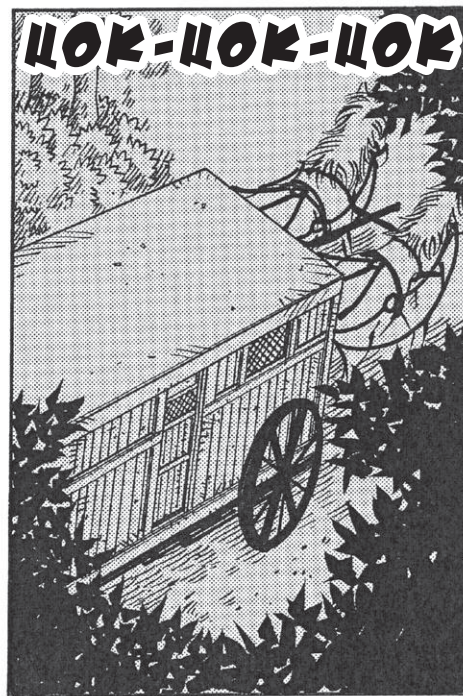
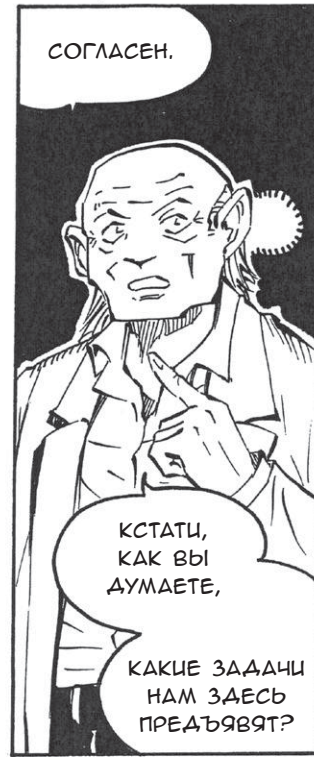


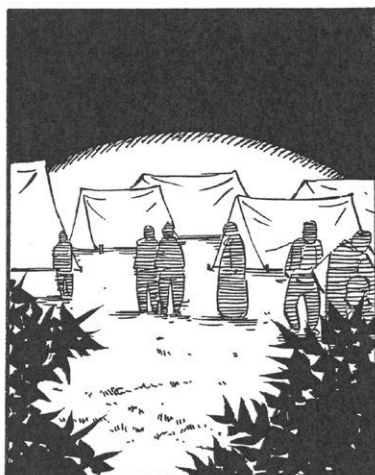












ГОСПОДА,
ЧТО
СЛУЧИЛОСЬ?



АХ. ДЕЛО В ТОМ,
ЧТО ДЕТАЛИ СЛИШКОМ УЖ
БУЙСТВУЮТ, ПОЭТОМУ
ЖИТЕЛИ ГОРОДА ЖИВУТ
В ЭТОМ ЛАГЕРЕ
БЕЖЕНЦЕВ.



ЗДЕСЬ НЕТ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ,
ПОЭТОМУ ДЕТАЛИ
СЮДА ПОЧТИ
НЕ ЗАХОДЯТ.



ЭТИ ДЕТАЛИ
С КАЖДЫМ ДНЁМ
ВСЁ СВИРЕПЕЮТ.

ГОСПОДА
ПУТЕШЕСТВЕННИКИ,
МОЖЕТ БЫТЬ, ВЫ
ПОМОЖЕТЕ НАМ?



Я СЛЫШАЛ, ЧТО
ПУТЕШЕСТВЕННИКИ
ЧАСТО ОКАЗЫВАЮТСЯ
ГЕРОЯМИ.

СПАСИТЕ НАС.

ПУТЕШЕСТВЕННИКИ-
ГЕРОИ? ЭТО ЧТО-ТО
ИЗ ДЕШЁВОЙ
ПРИКЛЮЧЕНЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ ИЛИ
ИЗ КОМИКСОВ.

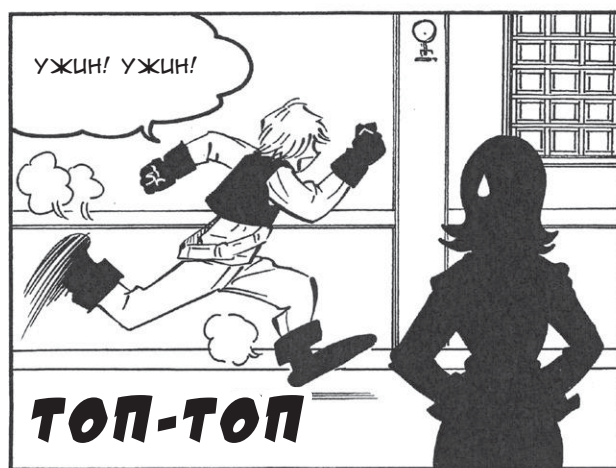


ЛАДНО, КАК БЫ ТАМ
НИ БЫЛО, СЕЙЧАС
ДЕТАЛИ УСПОКОИЛИСЬ
НА ДВА ДНЯ.

ТАК ЧТО
Я ПРЕЛАГАЮ ВАМ,
ГОСПОДА, ВЕРНУТЬСЯ
ПО ДОМАМ И НЕМНОГО
ОТДОХНУТЬ.







■ КАК ВЫРАЗИТЬ МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА?



Как я уже объяснял в рассказе про цепи постоянного тока, мощность P , выделяющаяся в цепи постоянного тока при напряжении E и токе I равна:

$$P = EI.$$

В случае же переменного тока и напряжение, и ток изменяются во времени. Здесь мы будем обозначать их маленькими буквами: e и i . Разумеется, мощность тоже будет изменяться. Будут и такие изменения, которых не было в цепях постоянного тока. Этому будет посвящён мой дальнейший рассказ. Попробуем найти, чему будет равна мгновенная мощность $p = ei$ в том случае, если выполняются следующие отношения:

$$\text{Синусоидальное напряжение } e = E_m \sin \omega t = \sqrt{2} E \sin \omega t,$$

$$\text{Синусоидальный ток } i = I_m \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi).$$

Здесь E и I – действующие значения напряжения и тока.

Мы воспользуемся формулой тригонометрии $\cos(A - B) - \cos(A + B) = 2 \sin A \sin B$

В нашем случае $A = \omega t$, $B = \omega t - \varphi$

Формулы тригонометрии я приведу на следующей странице – запомните их как следует.

Расчёт мощности переменного тока

$$\begin{aligned} P &= ei = \sqrt{2} E \sin \omega t \times \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \\ &= 2EI \{ \sin \omega t \times \sin(\omega t - \varphi) \} \\ &= EI \cos \varphi - EI \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

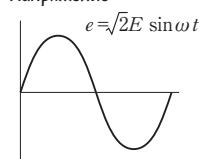
Как ясно из выше приведённых вычислений

- (1) Член $EI \cos \varphi$ не включает время t , поэтому он не изменяется во времени. Другими словами, это константа.
- (2) Член $EI \cos(2\omega t - \varphi)$ содержит $2\omega t$, значит это – синусоида с частотой в два раза выше, чем частота напряжения и тока. Следовательно, среднее значение за период равно 0. (см. рис)

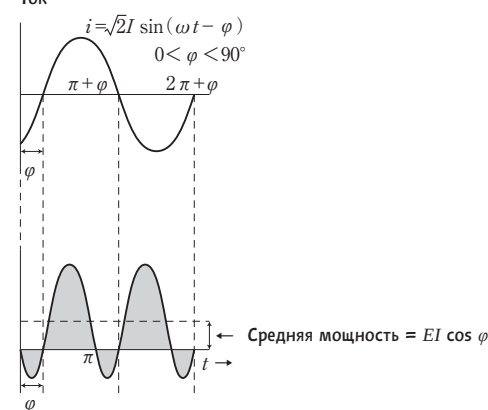
• Мощность переменного тока в любой момент времени равна (1)–(2), поэтому средняя мощность:

$$P = EI \cos \varphi$$

Напряжение



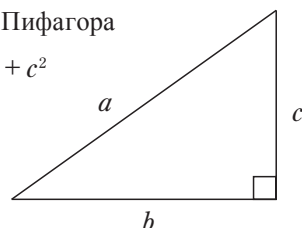
Ток



Мощность изменяется с частотой в два раза больше, чем напряжение и ток. 2. Мгновенная мощность $p =$ Средняя мощность – Гармоническая составляющая мощности $= EI \cos \varphi - EI \cos(2\omega t - \varphi)$.
При $\varphi = 0$ $P = EI \cos \varphi$; при $\varphi = 90^\circ$ $P = 0$.

Теорема Пифагора

$$a^2 = b^2 + c^2$$



Формулы сложения и вычитания аргументов

$$\sin (\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos (\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\tan (\alpha \pm \beta) = \frac{\tan \alpha \pm \tan \beta}{1 \mp \tan \alpha \tan \beta}$$

Формулы двойного угла

$$\sin 2\alpha = 2\sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \text{ (формула сложения)}$$

$$= \cos^2 \alpha - (1 - \cos^2 \alpha)$$

$$\because \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$= 2\cos^2 \alpha - 1$$

$$= 1 - 2\sin^2 \alpha$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha}$$



Так как среднее значение гармонической составляющей за период равно 0, мы получим:

$$P = EI \cos \varphi \text{ [Вт]}$$

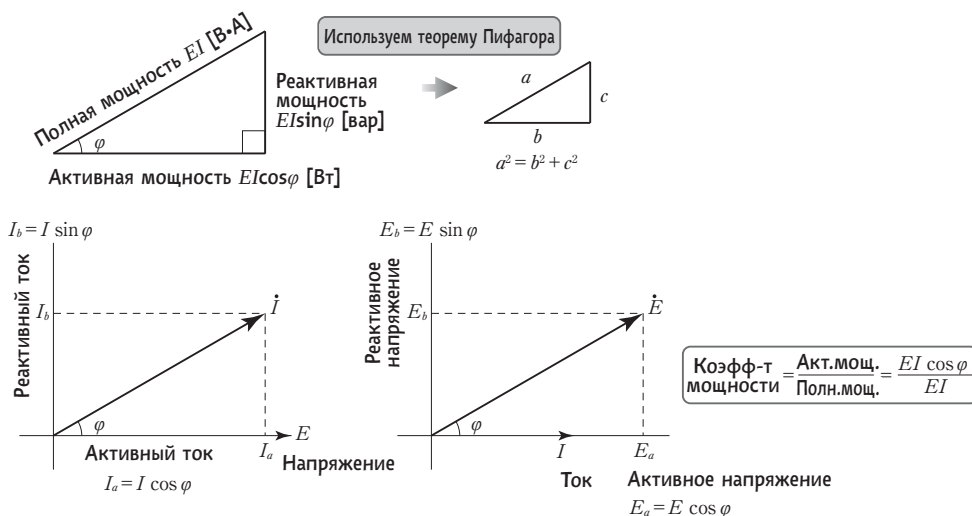
Угол φ – это угол запаздывания тока относительно напряжения, а его косинус $\cos \varphi$ называют «коэффициентом мощности».

Сейчас я расскажу вам о самом главном. Значения мгновенной мощности в цепи переменного тока в разные моменты времени либо положительны, либо отрицательны. Это происходит потому, что между источниками и приёмниками в цепи происходит обмен энергией.

Попробуем разложить мощность переменного тока на составляющие. Так как мощность – это работа, совершаемая током в единицу времени, её вообще-то невозможно разложить, однако мы проделаем это чисто математически, чтобы углубить наше понимание.



Чтобы подытожить знания о мощности переменного тока, я сделал эти рисунки.



EI = Полная мощность (единица измерения [В·А]),

$EI \cos \varphi$ = Мощность P (её также называют «активной мощностью»),

$EI \sin \varphi$ = Реактивная мощность Q (единица измерения [вар]).

Так как активная мощность и реактивная мощность являются катетами прямоугольного треугольника, выполняется следующее соотношение (по теореме Пифагора):

$$[\text{Полная мощность}]^2 = [\text{Активная мощность}]^2 + [\text{Реактивная мощность}]^2.$$

Далее, на диаграмме разложения мощности переменного тока присутствуют следующие составляющие:

$I \cos \varphi$ = Активный ток (его называют также «активной составляющей тока»),

$I \sin \varphi$ = Реактивный ток (его называют также «реактивной составляющей тока»).

Активная и реактивная составляющие тока также являются катетами прямоугольного треугольника. То же самое можно сделать и с напряжением:

$E \cos \varphi$ = Активное напряжение («активная составляющая напряжения»),

$E \sin \varphi$ = Реактивное напряжение («реактивная составляющая напряжения»).

Из выше приведённых формул можно вывести следующие отношения:

$$\text{Коэффициент мощности} = \frac{\text{Активная мощность}}{\text{Полная мощность}} = \frac{P}{EI} = \frac{EI \cos \varphi}{EI} = \cos \varphi$$

$$\text{Мощность} = \text{Напряжение} \times \text{Ток}$$

$$\text{Мощность (активная)} = \text{Напряж.} \times \text{Активный ток} = \text{Ток} \times \text{Активное напряж.}$$

$$\text{Реактивная мощность} = \text{Напряж.} \times \text{Реактивн. ток} = \text{Ток} \times \text{Реактивн. напряж.}$$

В расчётах электрических цепей важно уметь выбрать формулы, подходящие решаемой задаче.

■ СВЯЗЬ МЕЖДУ МОЩНОСТЬЮ, ПОЛНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ И КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ



Теперь посмотрим, как связаны между собой мощность, импеданс (полное сопротивление) и коэффициент мощности.

Для этого в последовательную цепь, содержащую активное r и реактивное x сопротивления, подключим источник синусоидального напряжения с действующим значением E . Действующее значение тока в цепи обозначим I . Если при этом мощность обозначить как P , а реактивную мощность – как Q , то можно записать следующие отношения:

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad P = EI \cos \varphi, \quad Q = EI \sin \varphi$$

Кроме того, напряжение и ток связаны соотношением $E = ZI$:

$$E \cos \varphi = rI, \quad E \sin \varphi = xI, \quad E = ZI = \sqrt{r^2 + x^2} I$$

Используя это, можно выразить P и Q следующим образом:

$$P = EI \cos \varphi = rI^2, \quad Q = EI \sin \varphi = xI^2$$

Из этих формул видно, что активная мощность P расходуется на активном сопротивлении r , а реактивная мощность – на реактивном x . Кроме того, выражая ток в виде вектора $\dot{I}$, мы получим:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{\dot{E}}{Z e^{j\varphi}} = \frac{\dot{E}}{Z} e^{-j\varphi}$$

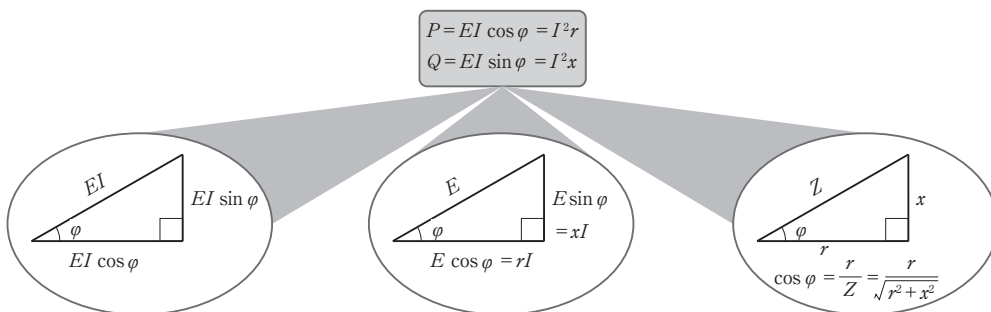
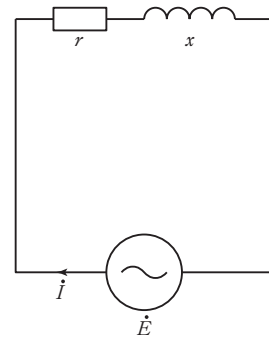
Мы получили, что угол φ между векторами тока и напряжения определяется характером полного сопротивления $\dot{Z}$. Если принять

$$\dot{Z} = r + jx,$$

то мы получим следующие отношения:

$$Z = Z e^{j\varphi}, \quad \tan \varphi = \frac{x}{r}, \quad \cos \varphi = \frac{r}{|Z|} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

В связи с этим угол φ называют также «фазовым углом импеданса»



■ ВЕКТОРНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ МОЩНОСТИ



Теперь мы изучим, как выражается мощность в векторном виде. Недавно мы смогли выразить синусоидальное напряжение и ток с помощью комплексных чисел. Теперь мы будем рассматривать мощность.

Напр. $\dot{E} = \sqrt{2}E e^{j\omega t}$ Ток $\dot{I} = \sqrt{2}I e^{j(\omega t - \varphi)}$	$\rightarrow$	Попробуем вычислить мощность $\dot{E}\dot{I}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned}\dot{E}\dot{I} &= \sqrt{2}E e^{j\omega t} \times \sqrt{2}I e^{j(\omega t - \varphi)} \\ &= 2EI e^{j(2\omega t - \varphi)} \\ &= ???\end{aligned}$
--	---------------	---	---------------	---



Как видите, у нас получилось, что полная мощность $\dot{E}\dot{I}$ изменяется по синусоидальному закону с удвоенной частотой и разностью фаз φ и имеет амплитуду, равную удвоенной средней мощности.



И это правильно?



Как я только что говорил, мощность изменяется в каждый момент времени, поэтому мгновенное значение мощности невозможно найти с помощью векторных диаграмм, которыми мы пользовались до этого.



Тогда что же нам делать?



Для того, чтобы построить вектора мощности, мы будем использовать не мгновенные значения, а действующие. Также мы используем сопряжённые комплексные числа. Я подытожил всё внизу – прочитайте внимательно.

Сопряжённые комплексные числа – это числа, которые отличаются между собой знаком мнимой части. Например, для комплексного числа

$$\dot{A} = a + jb$$

сопряжённым будет

$$\dot{A} = a - jb.$$

Чтобы обозначить это, над буквой $\dot{A}$ поставлена чёрточка $\dot{A}$.

$\dot{I}$ сопряжённое $\overline{\dot{I}} = I e^{-j(\omega t - \varphi)}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned}\dot{E}\overline{\dot{I}} &= E e^{j\omega t} \times I e^{-j(\omega t - \varphi)} \\ &= EI e^{j\varphi} \\ &= EI \cos \varphi + jEI \sin \varphi \\ &= \text{Акт. мощн.} + j\text{реакт. мощн.}\end{aligned}$	$\rightarrow$	Да
---	---------------	--	---------------	----

Теперь запишем это же, но с помощью сопряжённого комплексного напряжения:

$\begin{aligned}\overline{\dot{E}}\dot{I} &= E e^{-j\omega t} \times I e^{j(\omega t - \varphi)} \\ &= EI e^{-j\varphi} \\ &= EI \cos \varphi - jEI \sin \varphi\end{aligned}$
--



Знак реактивной мощности Q меняется на противоположный, не так ли? Поэтому для того, чтобы запаздывающая реактивная мощность имела множитель $+j$, нужно использовать $E\bar{I}$.

Итак, мы в общих чертах изучили мощность переменного тока. Теперь остаётся только закрепить знания на практике!



Мастер, задайте мне, пожалуйста, упражнение на это.



Что? Ты что, не уверен в себе?



Ещё как уверен! Это так, на всякий случай.



ЛЕКЦИЯ МАСТЕРА ЁТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ СИЛЫ (Ч)

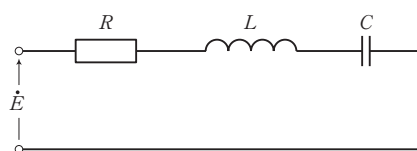
МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



Ладно, Фьюз. Попробуй решить вот эту задачу.

Задача

Имеется последовательная RLC -цепь, изображённая на этом рисунке. Приняв частоту источника питания за f , найти такое значение сопротивления R , при котором расходуемая мощность будет максимальна. В качестве условия принять, что напряжение E , индуктивность L и электрическая ёмкость C — постоянные величины.



Без проблем! Полное сопротивление этой цепи, измеренное со стороны источника, обозначаем $\dot{Z}$. Тогда мы можем записать следующее:

$$\text{Комплексное } \dot{Z} = R + jX_L - jX_C.$$

$$\text{Модуль } |Z| = Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

$$\text{Коэффициент мощности цепи } \cos \varphi = \frac{R}{|\dot{Z}|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

При этом для тока I будет выполняться:

$$\text{Модуль } |I| = \frac{E}{|\dot{Z}|} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Расходуемая мощность P данной цепи выражается следующим образом с помощью формулы активной мощности цепи переменного тока:

$$P = EI \cos \varphi = \frac{RE^2}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1)$$



Теперь начинается самое интересное. Преобразуем формулу (1), поделив числитель и знаменатель на R :

$$P = \frac{E^2}{R + [(X_L - X_C)^2]/R} \quad (2)$$

Чтобы P было максимально, нужно сделать так, чтобы знаменатель выражения (2) был минимальным. Поэтому я использую «Теорему о максимальной мощности», которой меня по секрету научил Хиудзу-сан.

Теорема о максимальной мощности

Если есть две переменные x и y , произведение которых равно константе K , то сумма этих переменных будет минимальной тогда, когда они равны между собой.

Пользуясь этой теоремой, найдём произведение K двух слагаемых, входящих в знаменатель:

$$K = R \frac{(X_L - X_C)^2}{R} = (X_L - X_C)^2 = \text{const}$$

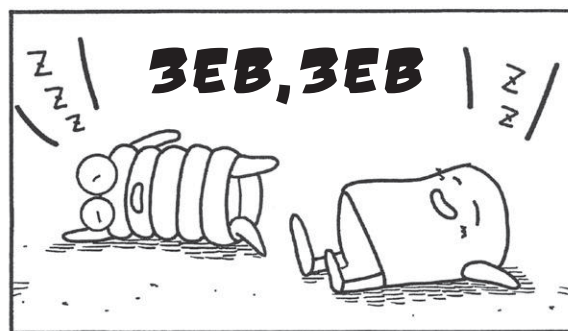
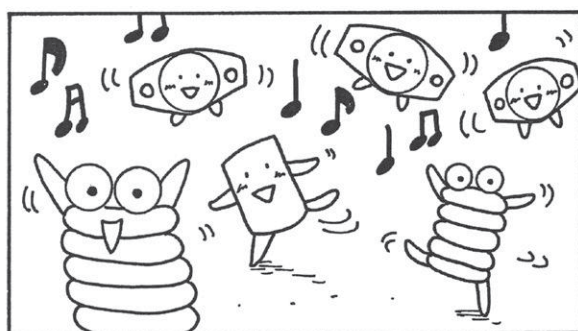
Произведение оказалось равно константе, поэтому сумма будет минимальна тогда, когда эти члены равны между собой:

$$R = \frac{(X_L - X_C)^2}{R} \rightarrow R^2 = (X_L - X_C)^2$$

$$R = X_L - X_C \quad (3)$$

Когда выполняется отношение (3), знаменатель выражения (2) будет минимальным, а само выражение (2) – максимальным. Обозначив максимальную расходуемую мощность за $P_{\max}$ и проведя подстановку на основе полученного отношения (3), мы получим следующее:

$$P_{\max} = \frac{E^2}{R + R^2/R} = \frac{E^2}{2R}.$$







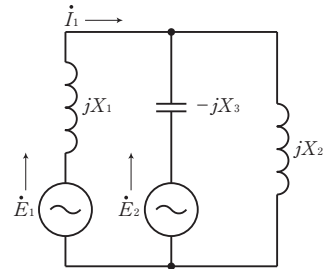


Итак, задача!

В цепи на правом рисунке найти ток I_1 , протекающий через jX_1 . Здесь E_1 и E_2 синфазны. Кроме того, принять:

$$E_1 = 100 \text{ В}, E_2 = 60 \text{ В},$$

$$X_1 = 30 \text{ Ом}, X_2 = 20 \text{ Ом}, X_3 = 10 \text{ Ом}.$$



Ну, это, похоже, решается с помощью правил Кирхгофа. Приступим! Приняв направления токов, как показано на рисунке справа, применим второе правило Кирхгофа:

Контур (1):

$$jX_1 I_1 - jX_3 (-I_2) = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 \quad (1)$$

Контур (2):

$$-jX_3 I_2 + jX_2 (I_1 + I_2) = \dot{E}_2 \quad (2)$$

Подставляя значения в уравнения (1) и (2), получим:

$$j30 I_1 + j10 I_2 = 100 - 60 = 40 \quad (3)$$

$$-j10 I_2 + j20 (I_1 + I_2) = 60$$

$$j20 I_1 + j10 I_2 = 60 \quad (4)$$

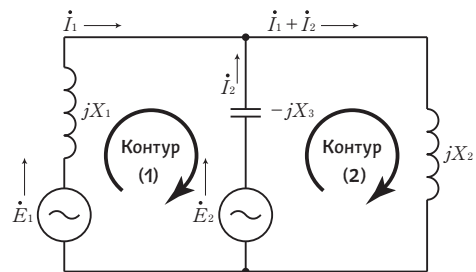
Теперь вычтем из уравнения (3) уравнение (4):

$$j10 I_1 = -20$$

$$I_1 = j2 \text{ [A]}$$

$$I_1 = |I_1| = 2 \text{ [A]}$$

Ну как?!



$$X_1 = 30 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_2 = 20 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_3 = 10 \text{ [}\Omega\text{]}$$



Всем, всем, всем! Задача решена! Возвращайтесь на свои рабочие места!



Ура! Фьюз! Теперь у нас много призов... Молодчина!!

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

РЕЗОНАНСНЫЕ ЦЕПИ, ТЕОРЕМА ТЕВЕНИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА

■ РЕЗОНАНСНЫЕ ЦЕПИ

Резонанс – это явление, возникающее в цепи переменного тока с полным сопротивлением $\dot{Z} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ в том случае, когда $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

Частоту колебаний, возникающих при этом в контуре, называют резонансной частотой и рассчитывают по следующей формуле:

$$f = \frac{R}{2\pi\sqrt{LC}}$$

В данном случае импеданс полностью превращается в сопротивление R , а напряжение и ток совпадают по фазе и становятся максимальными. Резонансные цепи широко используются в электротехнике, например, в генераторах, однако иногда оказывают отрицательный эффект, вызывая большие токи.

■ ТЕОРЕМА ОБ АКТИВНОМ ДВУХПОЛЮСНИКЕ (ТЕОРЕМА ТЕВЕНЕНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА*)

Эта теорема говорит о следующем. Пусть у нас есть любая, даже очень сложная цепь с источниками и сопротивлениями, имеющая два разомкнутых вывода – так называемый активный двухполюсник. Мы собираемся подключить к двум её выводам полное сопротивление $\dot{Z}$. В таком случае, если мы знаем напряжение между двумя этими выводами до подключения (напряжение холостого хода), а также импеданс, измеренный со стороны этих выводов (входной импеданс двухполюсника), то мы сможем произвести расчёты с помощью наипростейшей эквивалентной схемы.

Обозначим выводы активного двухполюсника за a и b , напряжение холостого хода между ними – за $\dot{E}_{ab}$. Тогда, подключив к этим выводам импеданс $\dot{Z}$, мы можем вычислить текущий через него ток по следующей формуле:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_{ab}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}}$$

Здесь $\dot{Z}_0$ – это входной импеданс пассивного двухполюсника. Пассивный двухполюсник – это электрическая цепь, получаемая путём замены всех ЭДС активного двухполюсника их внутренними сопротивлениями..

* Правильное название – теорема Тевенена-Гельмгольца (Гельмгольца-Тевенена), то есть теорема об активном двухполюснике. Однако в литературе наиболее распространено неправильное произношение – «теорема Тевенина» (прим. перев.).

Давайте на примере цепи постоянного тока уясним, в чём заключается идея.

(1) Есть какая-то очень сложная цепь, между разомкнутыми выводами a b которой действует напряжение E_{ab} . Найдём, какой ток потечёт через сопротивление R , подключенное к этим выводам.

Вместе с сопротивлением R мы подключим ЭДС E_1 , равную по величине E_{ab} , но направленную противоположно. Поэтому ток через сопротивление R течь не будет.

(2) Теперь превратим наш активный двухполюсник в пассивный путём исключения всех ЭДС, содержащихся внутри него. Кроме того, заменим ЭДС E_1 на ЭДС E_2 , равную по величине E_1 , но направленную противоположно. Так как $E_2 = E_{ab}$, ток через сопротивление R будет следующим:

$$I = \frac{E_{ab}}{R_0 + R}.$$

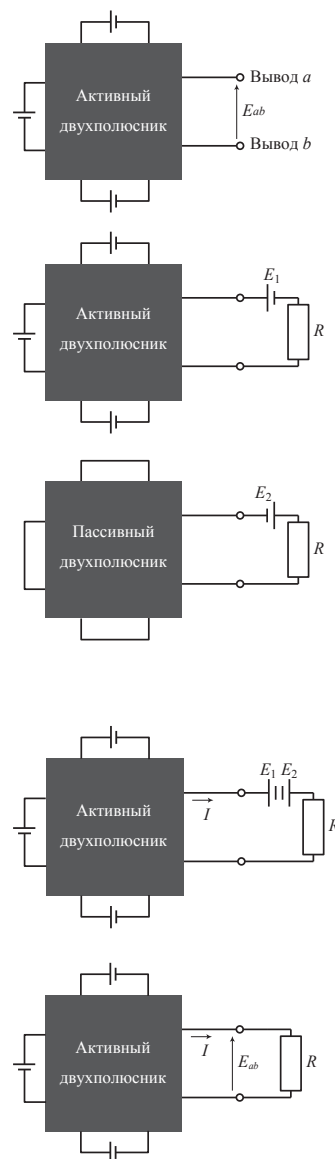
Здесь R_0 – входное сопротивление пассивного двухполюсника.

(3) Теперь попробуем наложить эти две цепи друг на друга. Источники напряжения E_1 и E_2 равны по величине и противоположно направлены, что эквивалентно их отсутствию. Кроме того, в цепи пункта (1) ток отсутствует, поэтому, согласно теореме наложения, ток будет равен $0 + I = I$.

Итак, мы доказали, что схема, полученная в пункте (2), является эквивалентной исходной схеме, и ток через нагрузку, подключенную к выводам a и b , рассчитывается как

$$I = \frac{E_{ab}}{R_0 + R}.$$

Теперь попробуем применить к задаче, решённой на стр. 156, другие методы решения: теорему наложения и теорему Гельмгольца-Тевенена.



Решение с помощью теоремы наложения.

(Про теорему наложения см. стр.74)

Рассмотрим случай, когда E_2 закорочено – действует только E_1 . Тогда ток I'_1 , текущий через jX_1 , будет равен:

$$I'_1 = \frac{100}{j30 + \frac{-j10 \times j20}{-j10 + j20}} = -j10.$$

Рассмотрим случай, когда E_1 закорочено – действует только E_2 . Тогда ток I''_3 , текущий через jX_1 , будет равен:

$$I''_3 = \frac{60}{-j10 + \frac{j30 \times j20}{j30 + j20}} = -j30.$$

Обозначим за I''_1 ток, который ответвляется от тока I''_3 и протекает через jX_1 . Он будет равен следующему:

$$I''_1 = -j30 \times \frac{j20}{j30 + j20} = -j12.$$

Тогда

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = -j10 - (-j12) = +j2$$

$$I_1 = |I_1| = 2 \text{ [A]}$$

Решение с помощью теоремы Гельмгольца-Тевенена.

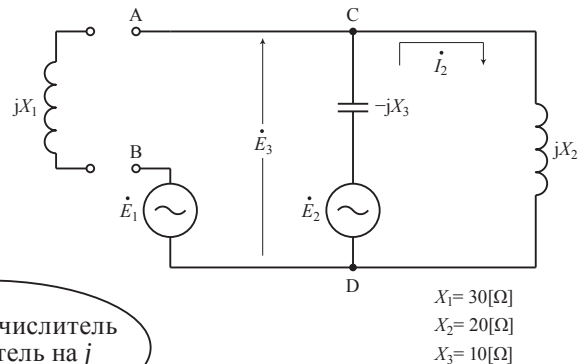
Чтобы найти ток через jX_1 , разделим схему так, как показано на рисунке, и найдём напряжение между A и B. Обозначив напряжение в точке C за E_3 , а ток – за I_2 , получим:

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2}{j20 - j10} = \frac{60}{j10} = \frac{j60}{(j \times j) \times 10} = \frac{j60}{-10} = -j6 \text{ [A]}$$

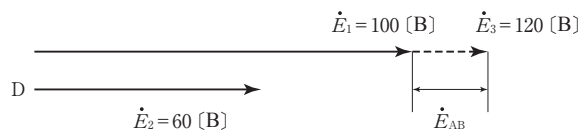
Домножаем числитель и знаменатель на j ($j \times j = -1$)

$$\begin{aligned} \dot{E}_3 &= \dot{E}_2 - jX_3 I_2 = \\ &= 60 - (-j10) \times (-j6) = \\ &= 60 + 60 = 120 \text{ [B]} \end{aligned}$$

Векторная диаграмма E_1 , E_2 и E_3 будет выглядеть следующим образом:



Векторная диаграмма



Следовательно, напряжение E_{AB} между A и B :

$$E_{ab} = 20 \text{ [В]}$$

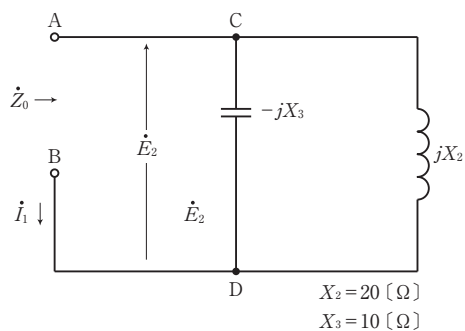
Полное сопротивление Z между выводами A и B :

$$\begin{aligned} \dot{Z}_0 &= \frac{j20 \times (-j10)}{j20 + (-j10)} = \\ &= \frac{-(j \times j) \times 200}{j20 - j10} = \\ &= \frac{200}{j10} = -j20 \text{ [Ом]} \end{aligned}$$

Следовательно, ток I_1 , текущий через jX_1 :

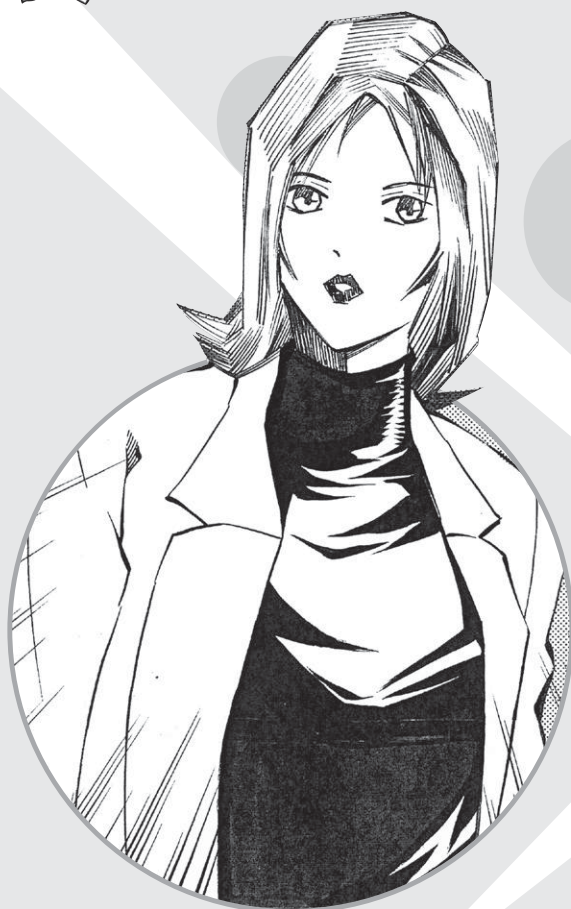
$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_{ab}}{Z + Z_0} = \\ &= \frac{20}{j30 - j20} = -j2 \text{ [А]} \end{aligned}$$

Знак «минус» означает, что ток направлен противоположно направлению, выбранному на схеме.



ГЛАВА 4

ЦЕПИ ТРЁХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



1. ВЫГОДЫ ТРЁХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



МОЖЕТ, ГДЕ-НИБУДЬ
ЕЩЁ ЕСТЬ ЧАСТИ МОЕГО
КОМПЬЮТЕРА.



КАК ВЫ ДУМАЕТЕ,
ЖЕСТКИЙ ДИСК ЦЕЛ?



НУ, ЭТОГО Я НЕ ЗНАЮ.
НО ВНЕШНИХ
ПОВРЕЖДЕНИЙ НА НЁМ
ВРОДЕ НЕ БЫЛО.

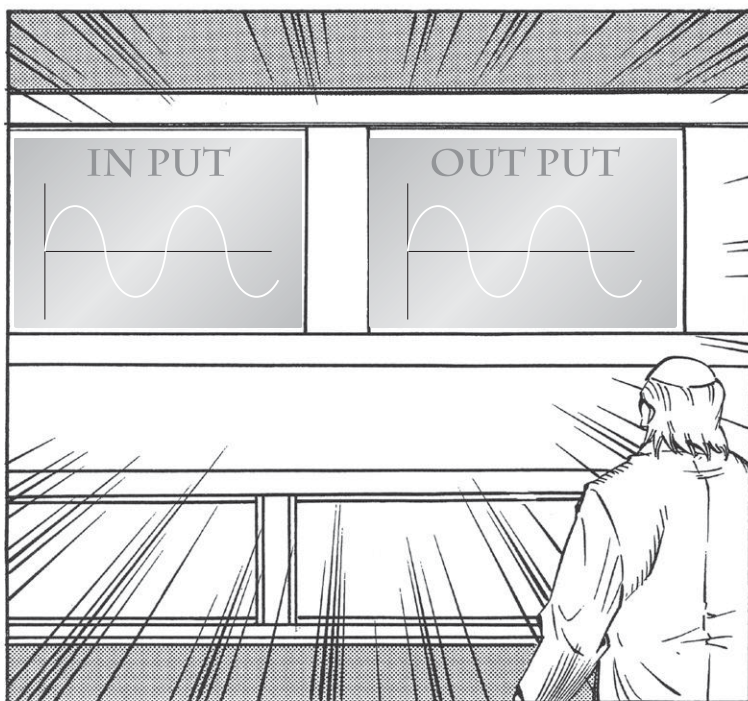


**ШУРУХ-
ШУРУХ**



ОХ, КУДА ЖЕ
Я ЕГО
ЗАСУНУЛ?





■ ПРИЧИНА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЁХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



Знаете ли вы причину, почему вообще для бытовых нужд стал использоваться переменный ток? Самая первая электростанция, созданная Эдисоном в 1879 году, представляла собой генератор постоянного тока. Однако генераторы постоянного тока из-за большого падения напряжения мало подходили для дальней электропередачи. Дело в том, что когда напряжение постоянного тока снижалось, снова повысить его не могли. Здесь на сцену выходит генератор переменного тока. Так как напряжение переменного тока можно легко понижать и повышать с помощью трансформаторов, его можно передавать на более дальние расстояния, чем постоянный ток. Далее, передавать трёхфазный переменный ток экономически выгоднее, чем однофазный. В быту мы пользуемся однофазным переменным током, однако в линии электропередач, на заводы подаётся трёхфазный переменный ток. Взгляните на этот рисунок.

Город Трансформации, в который мы собираемся идти, соответствует обведённой в кружок части. И нам, по всей видимости, придётся решать проблемы, связанные с трёхфазным переменным током. Поэтому вы должны изучить его, перед тем, как мы отправимся в путь.



Да. Но это, наверное, очень сложно...



А чего бояться! Вот решим задачу, и приз получим, и денег подзаработаем!



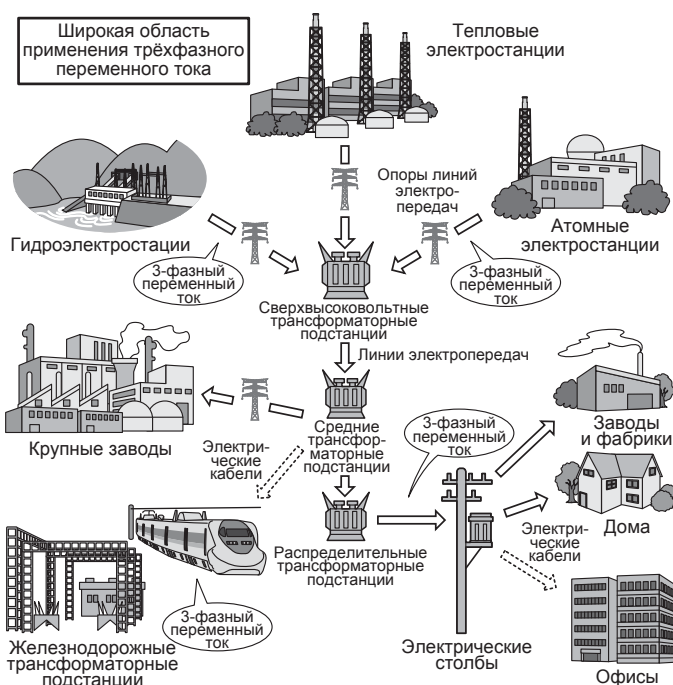
Космо, может на этот раз вместо меня выступишь ты?



Ах, я ведь ещё не до конца изучила математику, физику, электрические схемы. Мастер Ёта, натренируйте Фьюза как следует!



Без проблем. Ведь наша жизнь тоже от него зависит.



2. ПОДКЛЮЧЕНИЕ ТРЁХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

■ ЗВЁЗДЫ И МНОГОУГОЛЬНИКИ



Взгляните вот на это.

Многофазный переменный ток	Звезда	Многоугольник

Подобные системы, содержащие много ЭДС, называют многофазным переменным током. И самым практичным является трёхфазный переменный ток. В том случае, если все ЭДС трёхфазного переменного тока равны по величине, а фазы соседних ЭДС отличаются друг от друга на одинаковый угол, говорят о симметричном трёхфазном переменном токе.

Трёхфазный переменный ток	Звезда	Треугольник	Цепь симметричного трёхфазного переменного тока Величины E одинаковы Разности фаз одинаковы

Расскажу о нём подробнее. Чтобы в пределах 1 цикла, то есть в пределах 2π радиан, углы между соседними фазами были одинаковы, они должны быть вот такими:

$$360^\circ/3 = 120^\circ$$

или

$$(2/3)\pi \text{ [рад]}$$

В источнике трёхфазного переменного тока ЭДС, или фазы, могут быть соединены между собой двумя способами: звездой (Y) или треугольником (Δ). То же самое относится и к фазам приёмника (с полными сопротивлениями Z).

3. ИЗУЧАЕМ ТРЁХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРОВ

■ ОПЕРАТОР ПОВОРОТА



Взгляните на рис.1. Если мы обозначим мгновенные ЭДС каждой из трёх фаз за E_a , E_b и E_c , то из-за разности фаз мгновенные значения этих ЭДС будут чередоваться в порядке $a-b-c$, и каждая последующая фаза будет отставать от предыдущей на 120° . Приняв вектор E_a за опорный, изобразим это в виде векторной диаграммы (рис. 2). Примем, что напряжение равно 1, и рассмотрим способ выражения этой векторной диаграммы.

Как мы уже знаем, переменный ток можно выразить с использованием мнимой единицы j . Идея здесь такая же – не учитывая конкретные величины, мы введём оператор a , который поворачивает вектор на 120° против часовой стрелки (это важный момент – обязательно против хода часовой стрелки!). С помощью оператора a , называемого оператором поворота, можно выразить стационарные векторы: умножение вектора на оператор a означает его поворот на $+120^\circ$, умножение на a^2 – на $+240^\circ$, при умножении на a^3 происходит возврат вектора в прежнее положение. Этот оператор удобен для представления вращающихся векторов в качестве стационарных.

Итак, теперь мы можем выразить трёхфазный переменный ток единичной величины в виде набора трёх комплексных чисел $1, a, a^2$. Если же величина напряжения равна E , то достаточно лишь умножить каждое из этих значений на E . Далее, сумма этих трёх значений равна 0. То есть: $E + aE + a^2E = 0$.

Это очень важное отношение и его надо запомнить.

Рис.1 Трёхфазный переменный ток

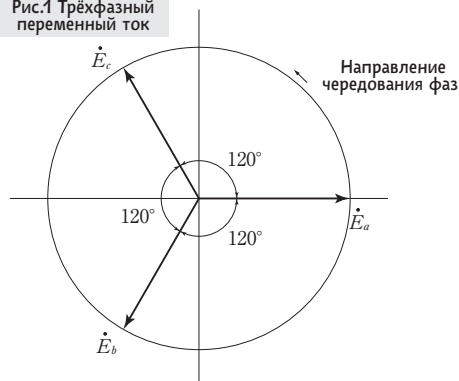


Рис. 2. Векторная диаграмма

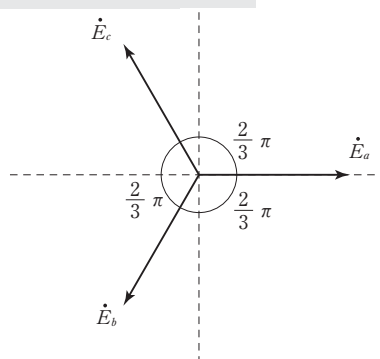
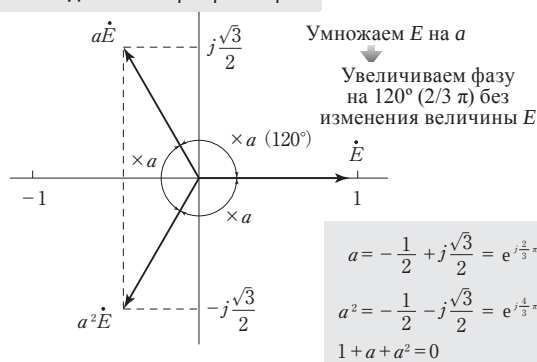


Рис. 3. Действие оператора поворота



■ ПОЧЕМУ ПРОВОДОВ ТРИ?



Сейчас я расскажу о трёхфазном переменном токе кое-что интересное. Трёхфазный переменный ток представляет собой комбинацию трёх однофазных переменных токов, фазы которых равны соответственно 0 , 120° и 240° .

Для начала взгляните на этот рисунок. Как вы видите, вначале каждый источник переменного тока формирует свой отдельный замкнутый контур. Если при этом сопротивления всех фаз приёмника одинаковы, то все токи, отличаясь по фазе, будут одинаковы по величине. В подобном случае можно объединить провода, обведённые на рисунке кружочком, в один провод. По-вашему, что это даст?



Можно будет обойтись всего четырьмя проводами.



Верно. Теперь, в цепи текут токи одинаковой величины и частоты, с разностями фаз 0 , 120° и 240° . Обозначив эти токи за $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ и $\dot{I}_c$, а их сумму – за $\dot{I}_0$, мы можем записать:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (1)$$

Для каждого из трёх фазовых векторов можно записать:

$$\dot{I}_a = I \quad (2)$$

$$\dot{I}_b = a^2 I \quad (3)$$

$$\dot{I}_c = a I \quad (4)$$

Теперь, подставив выражения (2), (3), (4) в уравнение (1), мы получим... Пусть об этом нам скажет Фьюз.

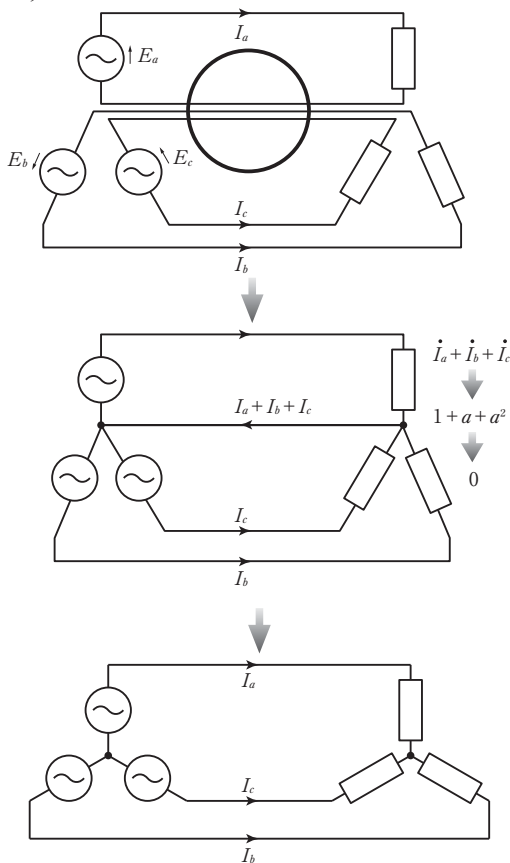


$$\dot{I}_0 = I + a^2 I + a I = I (1 + a^2 + a)$$

А! Мы получим 0 , то есть ток течь не будет.



Правильно. А это значит, что провод здесь не нужен.



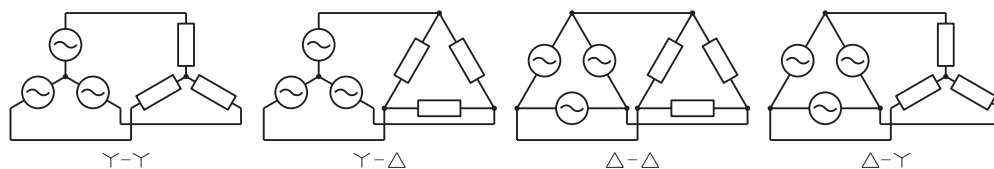
4. ТРЁХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ЗВЕЗДОЙ И ТРЕУГОЛЬНИКОМ

■ СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ «ЗВЕЗДОЙ» И «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»



Как уже вы поняли, если токи одинаковы по величине, то можно обойтись тремя проводами. Но как же обстоит дело на самом деле?

Я только что говорил, что бывают соединения фаз «звездой» и «треугольником». Эти способы подключения используются как на стороне источника, так и на стороне приёмника, поэтому может быть всего 4 комбинации, как показано на рисунке.



Для начала рассмотрим сторону источника. Вот это – соединение фаз источника «звездой». Напряжения на каждой из фаз называют фазными напряжениями, а напряжения между каждым из выводов a , b и c – линейными напряжениями. Линейные напряжения выражаются разностями векторов соответствующих фазных напряжений. То есть:

$$\dot{E}_{ab} = \dot{E}_a - \dot{E}_b$$

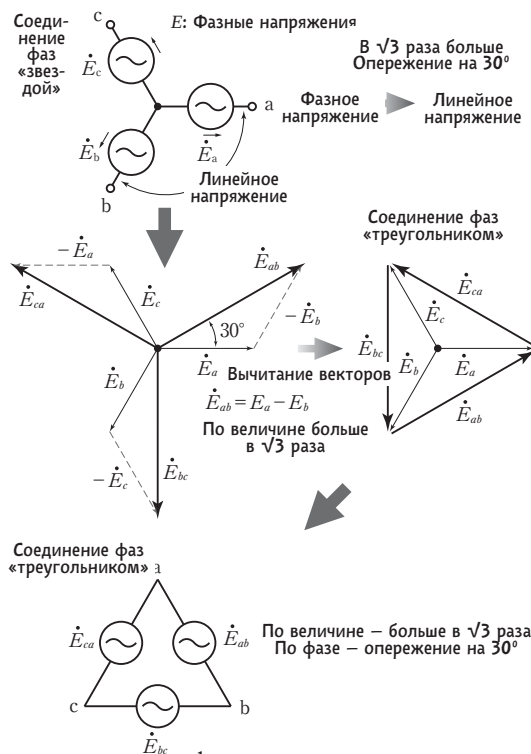
Согласно векторной диаграмме, для линейных напряжений выполняется отношение

$$\text{Линейное напряж.} = \sqrt{3} \text{ Фазное напряж.}$$

а по фазе каждое из линейных напряжений опережает соответствующее фазное напряжение на 30° ($\pi/6$).

Соединив «треугольником» три ЭДС, равных вышеуказанным линейным напряжениям $-\dot{E}_{ab}$, $\dot{E}_{bc}$ и $\dot{E}_{ca}$, мы получим эквивалентную схему. Теперь поговорим о приёмнике. Посмотрим, какие токи будут протекать, если симметричное трёхфазное напряжение приложено к симметричному трёхфазному приёмнику, фазы которого соединены «треугольником». Токи каждой из фаз приёмника (фазные токи) вычисляются по 2-му правилу Кирхгофа (правило падений напряжений: «В замкнутой цепи сумма ЭДС равна сумме падений напряжений на приёмниках»): $\dot{E}_{ab} = \dot{I}_{ab} \dot{Z}_{ab}$; $\dot{E}_{bc} = \dot{I}_{bc} \dot{Z}_{bc}$; $\dot{E}_{ca} = \dot{I}_{ca} \dot{Z}_{ca} \rightarrow \dot{I}_{ab} = \dot{E}_{ab} / \dot{Z}_{ab}$; $\dot{I}_{bc} = \dot{E}_{bc} / \dot{Z}_{bc}$; $\dot{I}_{ca} = \dot{E}_{ca} / \dot{Z}_{ca}$

Так как приёмник симметричный (то есть $\dot{Z}_{ab} = \dot{Z}_{bc} = \dot{Z}_{ca} = \dot{Z}$), токи каждой из фаз приёмника, то есть фазные токи, тоже образуют симметричную систему, отличаясь друг от друга на 120° ($2\pi/3$).



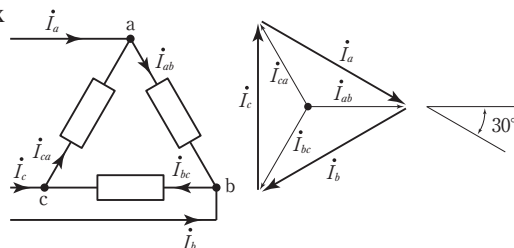
Далее, токи в каждом из проводов, то есть линейные токи I_a , I_b и I_c , согласно 1-му правилу Кирхгофа (Правило сохранения тока: «Сумма всех комплексных токов, входящих в любую точку электрической цепи, равна сумме всех комплексных токов, выходящих из этой точки») будут равны векторным разностям соответствующих фазных токов. То есть, для точек a , b и c :

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

Это означает, что будет выполняться следующее отношение:

$$\frac{\text{Линейный ток}}{\text{Фазный ток}} = \sqrt{3}$$

а по фазе каждый из линейных токов отстает от соответствующего фазного тока на 30° ($\pi/6$).



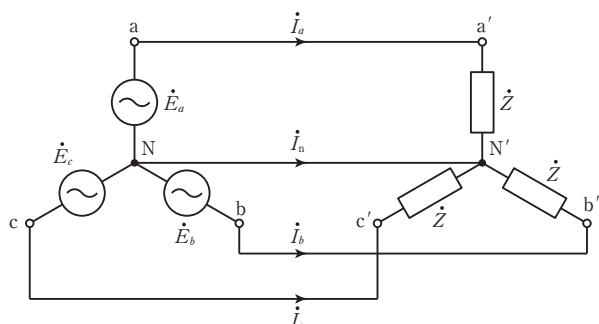
Линейные токи по величине в $\sqrt{3}$ больше фазных токов и отстают от них по фазе на 30°

■ СОЕДИНЕНИЯ «ЗВЕЗДА-ЗВЕЗДА» И «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК»



Теперь давайте рассмотрим стороны источника и приёмника совместно. Здесь изображён случай, когда на обеих сторонах фазы соединены «звездой». Начнём со случая четырёх проводов, соединив линии точки N и N' . Взглянув на эту схему вы, конечно, поймёте, что это — комбинация однофазных переменных токов.

Напряжения и токи при соединении фаз «звездой»



$$I_a + I_b + I_c = 0. \quad \text{Следовательно, } I_N = 0$$



Ток между N и N' находится как

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

Это симметричная трёхфазная цепь, в которой все токи одинаковы по величине и имеют разность фаз 120° . Значит, между N и N' ток не протекает!

Вижу, ты уже всё понял. Поэтому провода между N и N' тоже не нужно. При этом, можно записать:

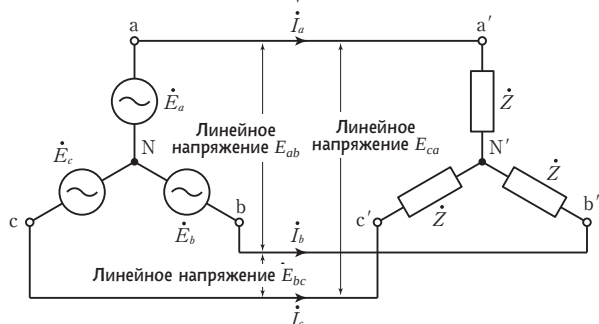


$$\frac{\text{Линейное напряж.}}{\text{Фазное напряж.}} = \sqrt{3}$$

(опережение на 30°),

$$\frac{\text{Линейный ток}}{\text{Фазный ток}} = 1$$

Получается, что линейные токи отстают от линейных напряжений на $30^\circ + \varphi$.

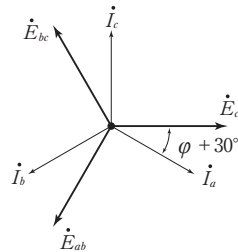




Итак, теперь рассмотрим случай, когда фазы источника соединены «звездой», а фазы приёмника – «треугольником». Когда будете обдумывать это, обратите внимание на то, что линейные напряжения опережают фазные на 30° . Обратите внимание, что к нагрузкам прикладываются не фазные напряжения, а линейные. Ну-ка, Фьюз, вырази это в векторной форме.



Так... значит, фазные токи будут синфазны линейным напряжениям, есть также линейные токи, отстающие на 30° от фазных токов. То есть получается, что линейные токи отстают от линейных напряжений на 30° . Так как линейные напряжения опережают фазные напряжения на 30° . Значит, сначала будет опережение на 30° , потом – запаздывание на 30° . Получится, что фазы линейных токов и фазных напряжений совпадают.



Линейные напряжения опережают фазные напряжения на 30°
Линейные токи отстают от линейных напряжений на $30^\circ + \varphi$
Следовательно, линейные токи отстают от фазных напряжений на φ , то есть в случае чисто активной нагрузки ($\varphi = 0$) они синфазны

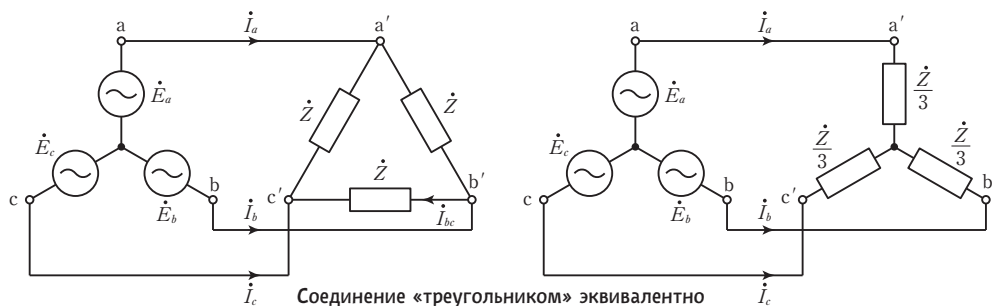


Теперь давайте также посмотрим, какой будет величина токов. Линейное напряжение у нас было равно $\sqrt{3} \times$ Фазное напряжение, линейный ток тоже был равен $\sqrt{3} \times$ Фазный ток. Следовательно, мы получим:

$$I_a = \frac{3E_a}{Z}.$$

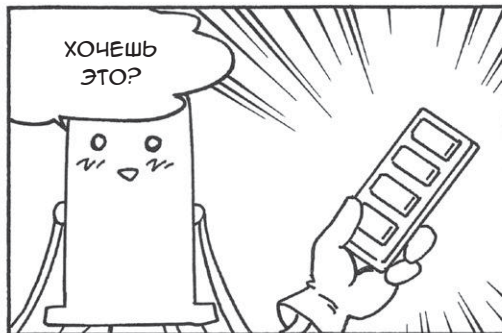
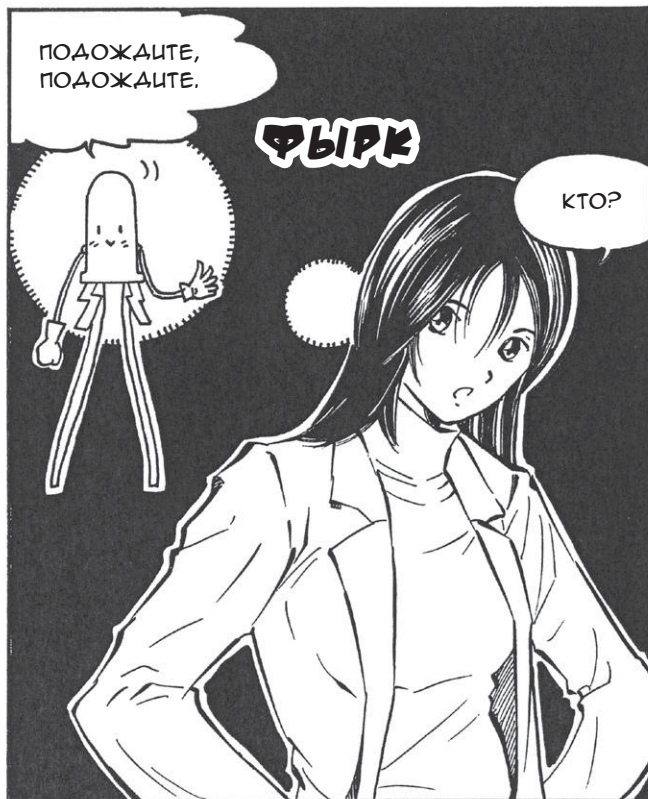
Это аналогично тому, если бы мы соединили «звездой» фазы приёмника с сопротивлениями $Z/3$. Поэтому можно сказать, что при нахождении линейных токов соединение «треугольником» фаз приёмника с сопротивлением Z эквивалентно соединению «звездой» фаз приёмника с импедансами $Z/3$.

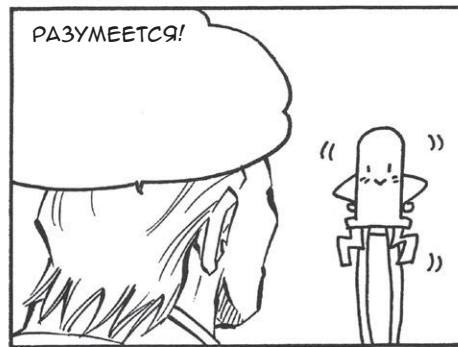
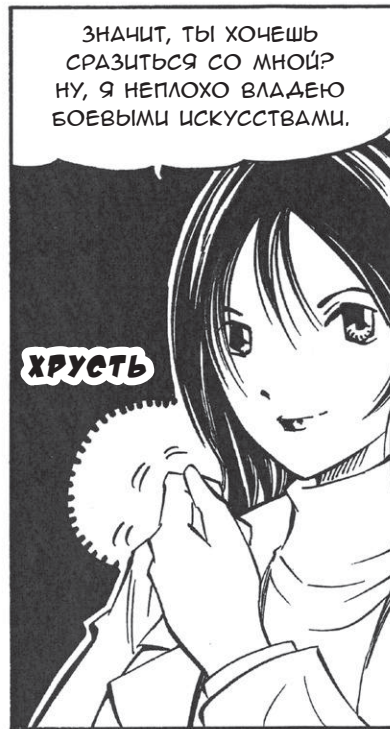
Замещение соединения фаз приёмника «треугольником» соединением «звездой»

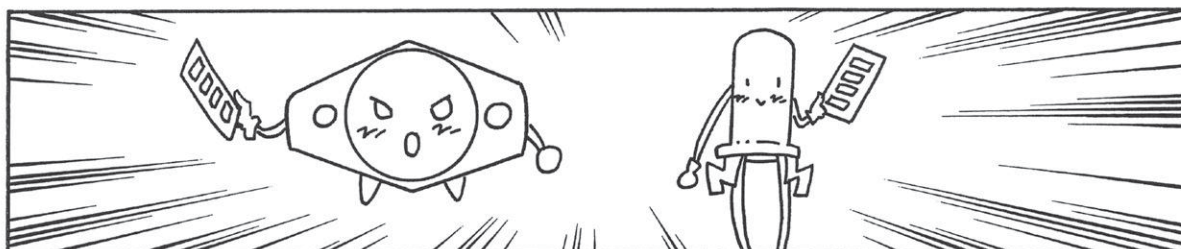
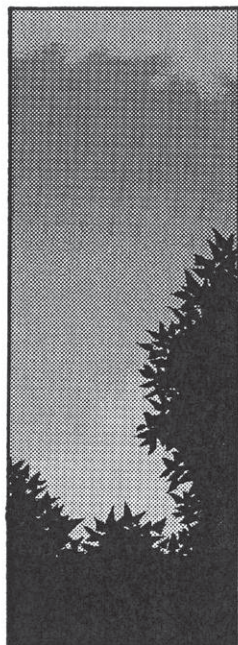


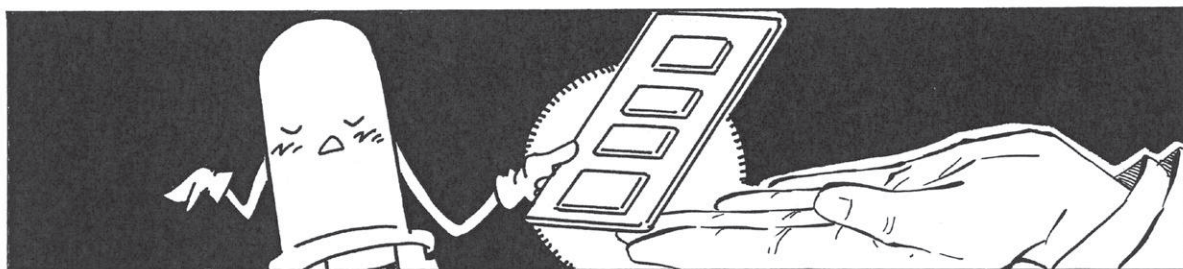
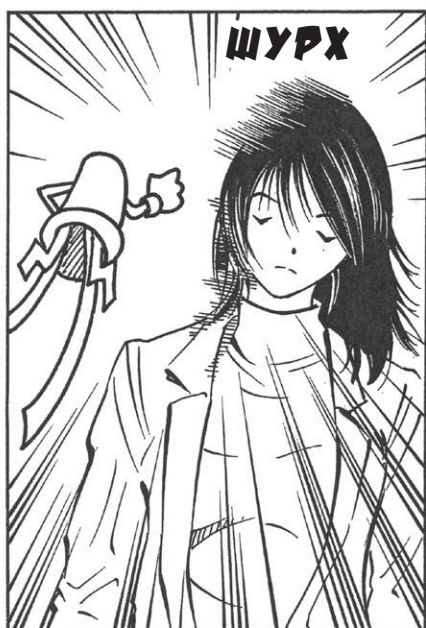
Соединение «треугольником» эквивалентно соединению $Z/3$ «звездой»

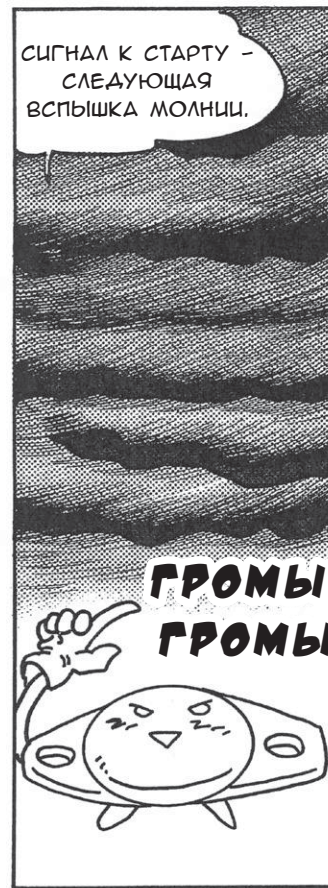
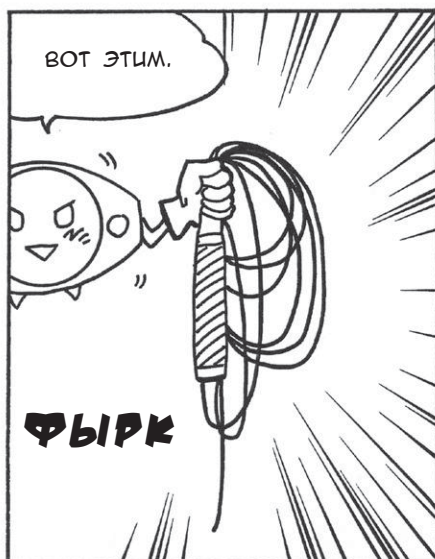
Линейные токи отстают от линейных напряжений на 30°

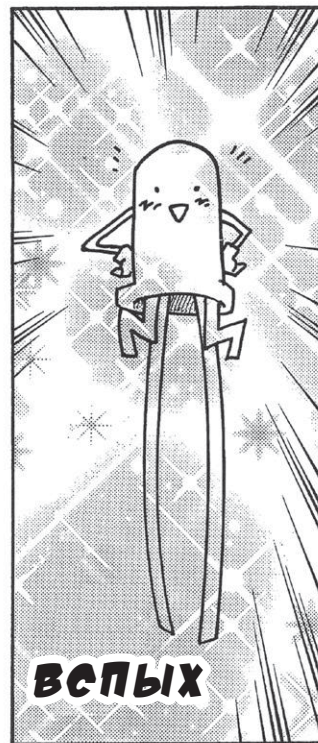
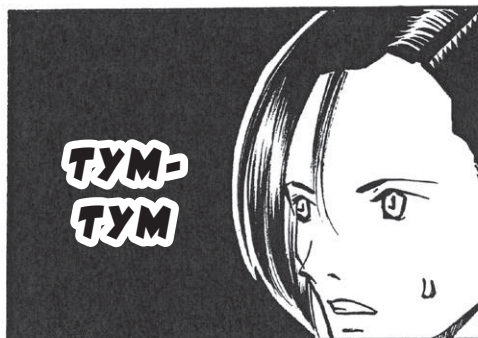
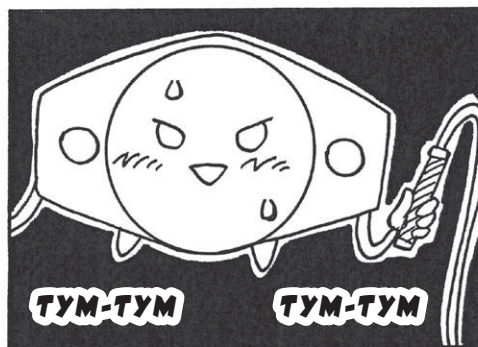
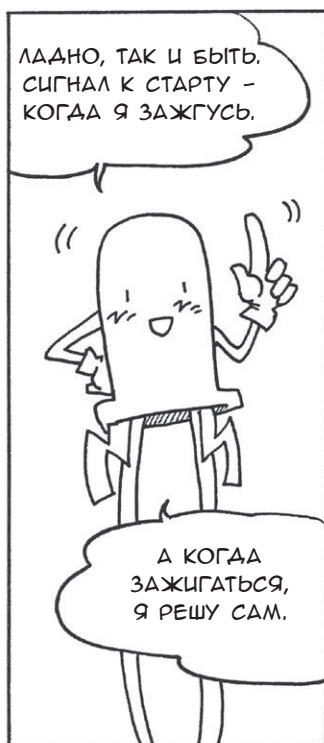
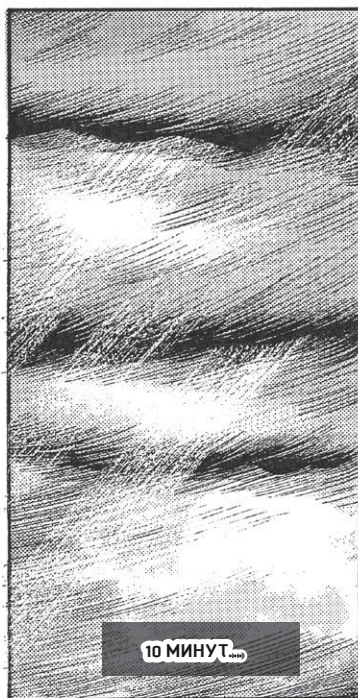
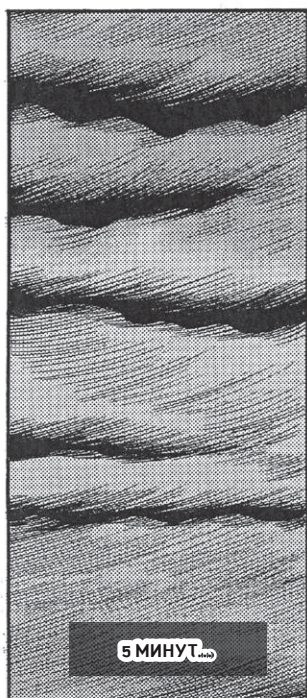


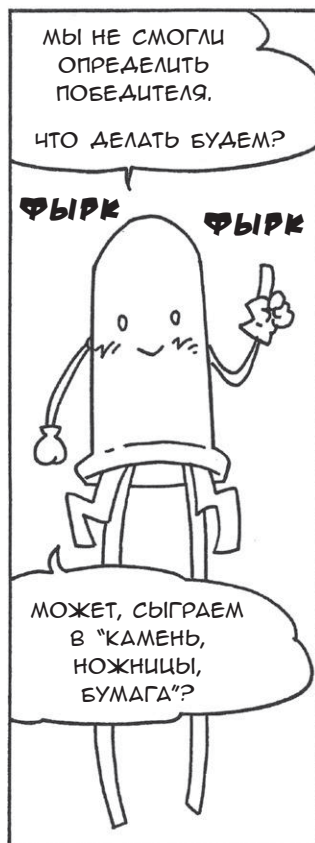
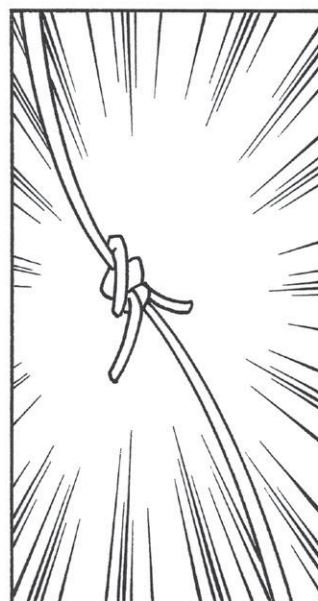
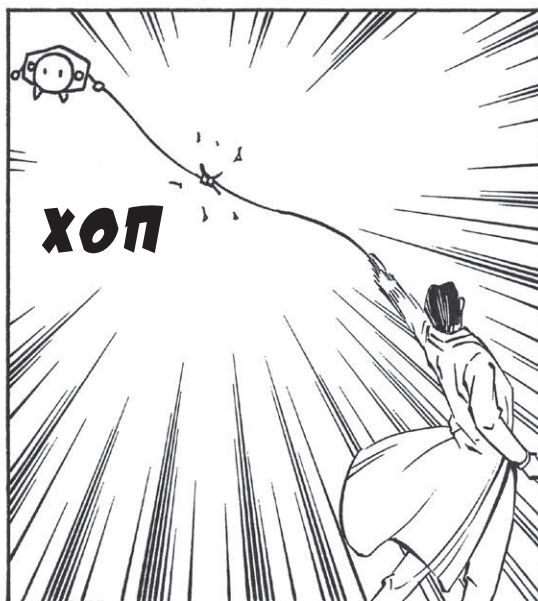


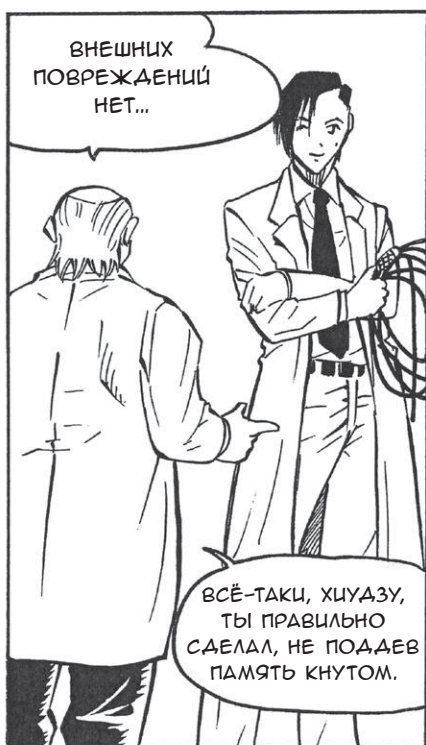








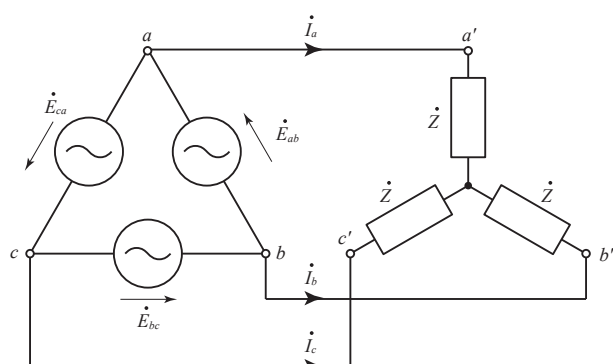




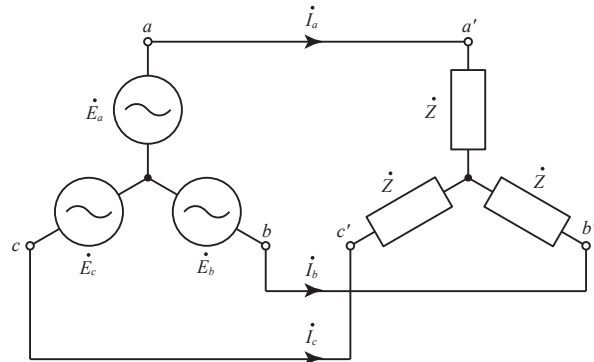
■ ОЧЕНЬ ПРОСТО! СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ИСТОЧНИКА «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»



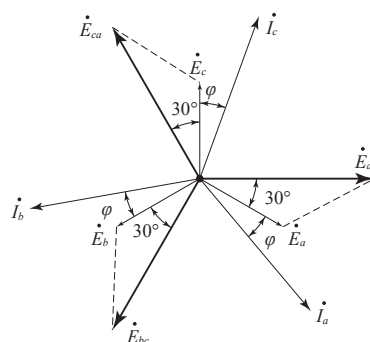
Сегодня мы изучим соединение «треугольник–звезда», то есть тот случай, когда фазы симметричного источника соединены «треугольником», а фазы симметричного приёмника «звездой». Этот случай удобно рассматривать, заменив «треугольник» стороны источника эквивалентной схемой «звезда» – соединёнными звездой фазными ЭДС, которые по величине в $\sqrt{3}$ раза меньше, а по фазе отстают на 30° от исходных. Как следует изучите и усвойте векторную диаграмму.



ЭДС эквивалентной схемы по величине в $\sqrt{3}$ раза меньше, а фазы отстают на 30° от фаз ЭДС исходной схемы



Векторная диаграмма для случая индуктивных сопротивлений – токи отстают от напряжений по фазе на угол φ .



Наконец рассмотрим цепь «треугольник–треугольник», то есть подключение к симметричному источнику типа «треугольник» симметричного приёмника типа «треугольник».

В этом случае также производится замена «треугольников» на «звёзды». При этом:

- (1) фазные напряжения источника по величине в $\sqrt{3}$ раза меньше, а по фазе отстают на 30° от линейных напряжений;
- (2) импедансы фаз приёмника, соединённых звездой, равны $Z/3$.

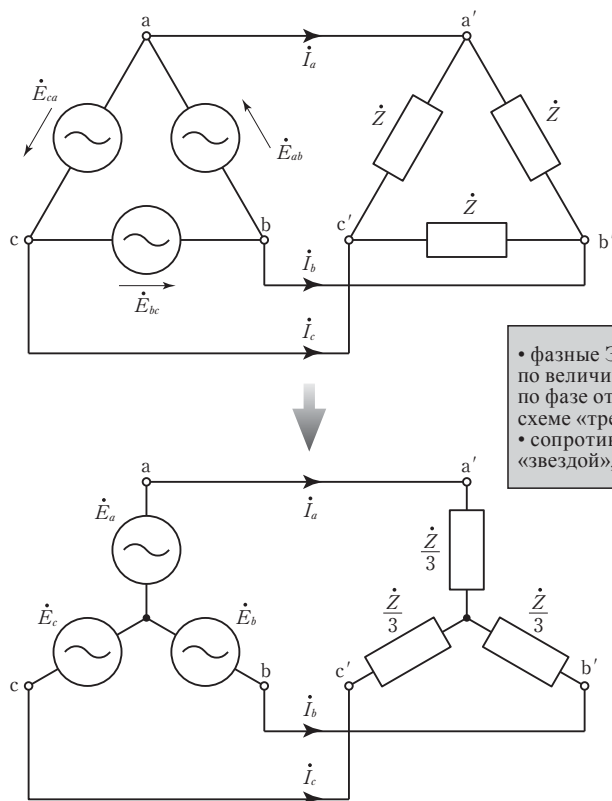


В цепи «звезда – звезда» линейные токи равны фазным токам. Чтобы найти их, достаточно поделить фазные напряжения (1) на импедансы (2) и получить формулу для линейных (фазных) токов в эквивалентной схеме «звезда–звезда»:

$$\dot{I}_a = \dot{E}_a / (Z/3) = (1/\sqrt{3}) \dot{E}_{ab} e^{-j30^\circ} / (Z/3) = \sqrt{3} \dot{I}_{ab} e^{-j30^\circ}.$$

Токи по величине в $\sqrt{3}$ раза больше, а по фазе отстают на 30° от фазных токов приёмника в исходной схеме («треугольник–треугольник»).

Поменяв местами эквивалентную и исходную схемы, получим, что фазные токи приёмника в эквивалентной схеме («треугольник-треугольник») по величине в $\sqrt{3}$ раза меньше, а по фазе опережают на 30° линейные токи.



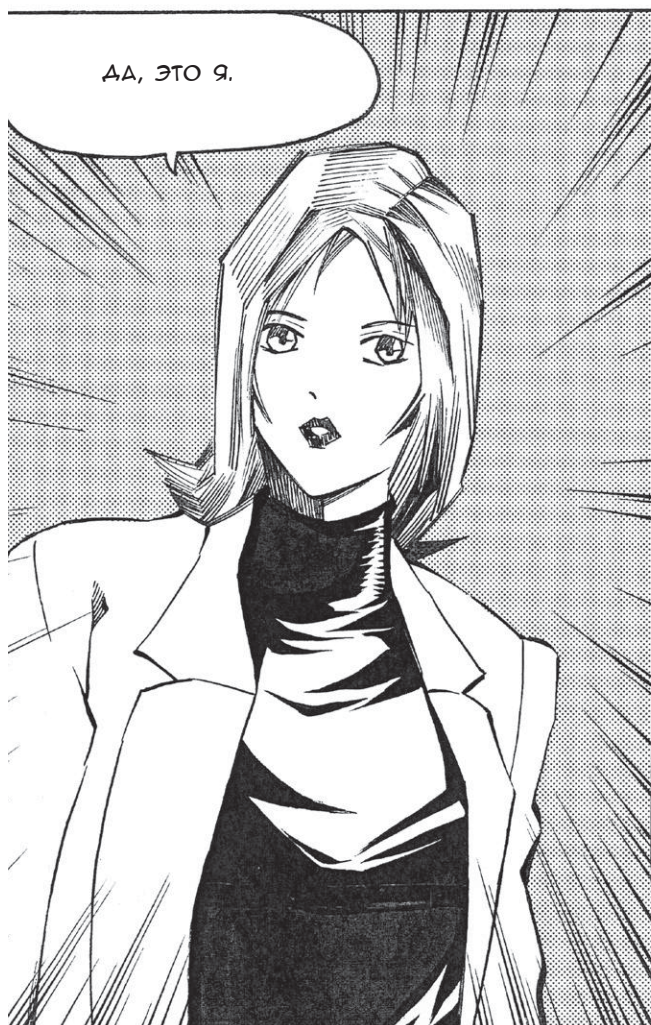
- фазные ЭДС эквивалентного источника по величине в $\sqrt{3}$ раза меньше, по фазе отстают на 30° от ЭДС в исходной схеме «треугольник»: $\dot{E}_a = (1/\sqrt{3}) \dot{E}_{ab} e^{-j30^\circ}, \dots$
- сопротивления приёмника, соединённые «звездой», равны $Z/3$

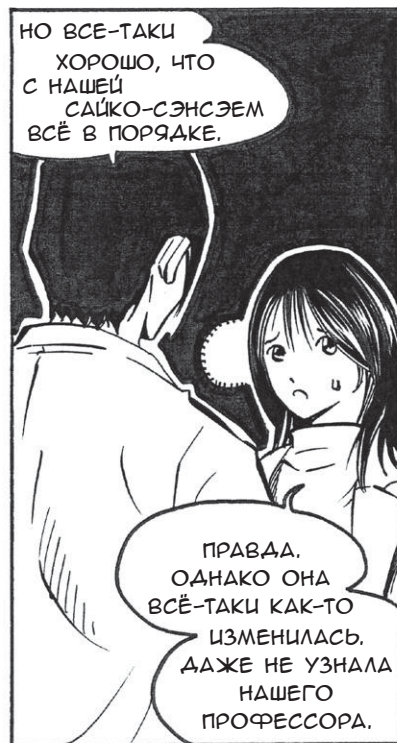
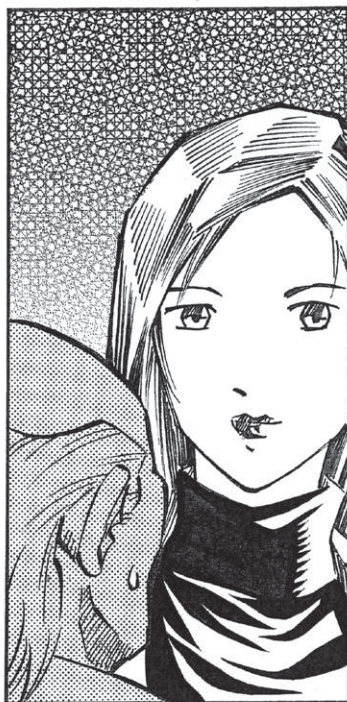
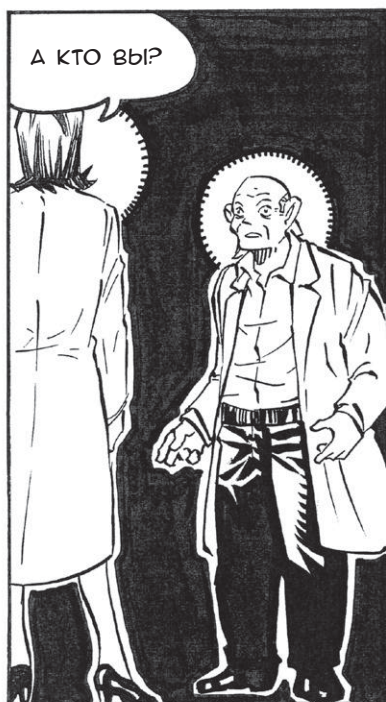
Обобщая информацию о токах в соединении «треугольник–треугольник»

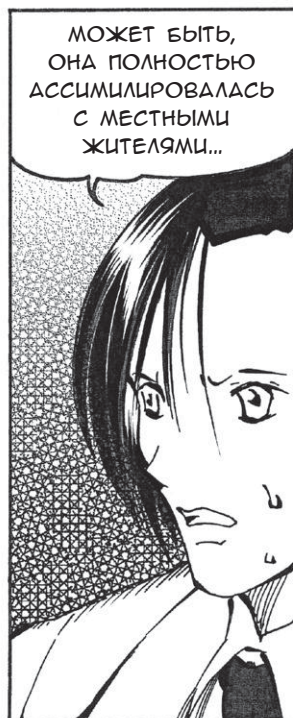
	Линейные токи	Фазные токи (в фазах приёмника)
Величины	В $\sqrt{3}$ раза больше фазных токов	В $\sqrt{3}$ меньше линейных токов (возврат в исходное состояние)
Фазы	Отстают на 30° от фазных токов	Опережают на 30° линейные токи (возврат в исходное состояние)

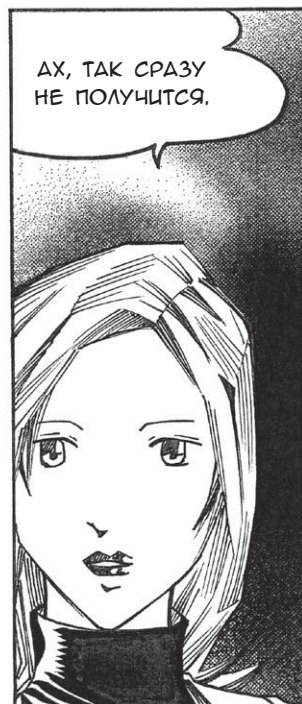
Фазные токи в схеме «треугольник–треугольник» найти очень просто: достаточно поделить фазное напряжение, приложенное к сопротивлению соответствующей фазы приёмника, на величину этого сопротивления.

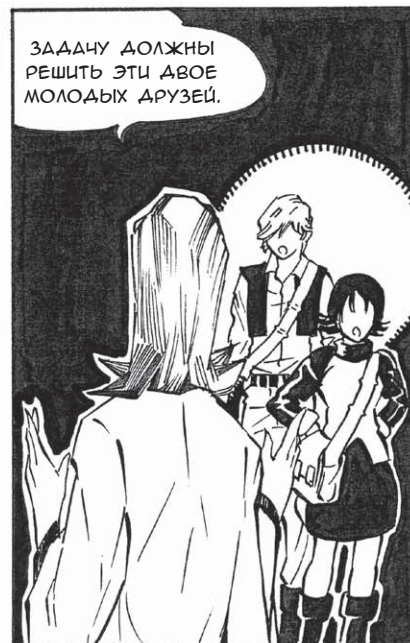
5. МОЩНОСТЬ ТРЁХФАЗНОГО ТОКА















Итак, рассмотрим мощность трёхфазного переменного тока. Когда вы её освоите, то можно сказать, что основами вы полностью овладели.

Трёхфазный переменный ток – это объединение трёх однофазных переменных токов, поэтому мы обозначим мощность каждой из трёх фазовых цепей за P_a , P_b и P_c . Тогда мощность P трёхфазного переменного тока будет равна:

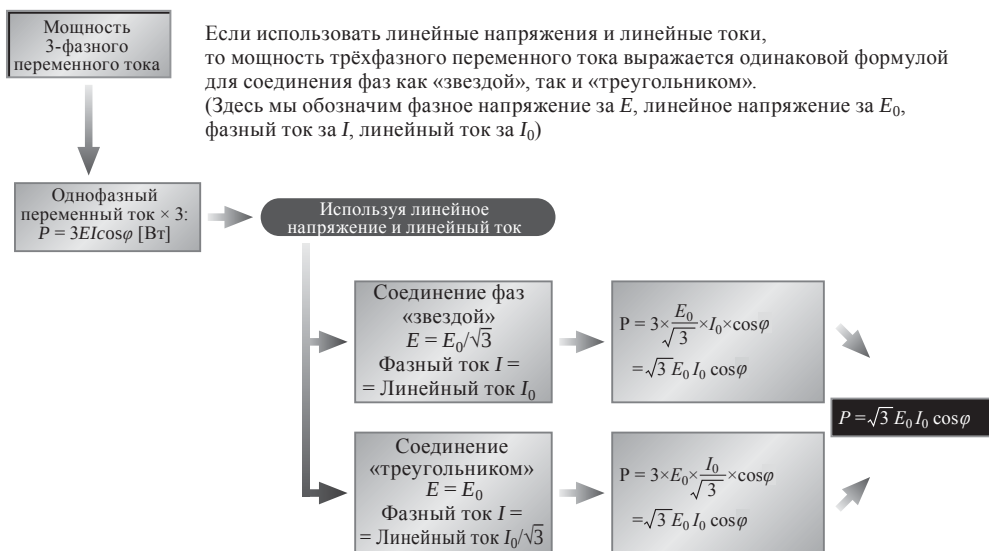
$$P = P_a + P_b + P_c.$$

В случае симметричного трёхфазного переменного тока мощность P будет равна

$$P = 3 \times \text{Фазное напряжение} \times \text{Фазный ток} \times \cos\varphi = 3EI\cos\varphi \text{ [Вт]}$$

(φ – угол запаздывания фазного тока по отношению к фазному напряжению).

Если выразить это с помощью линейных напряжений и линейных токов, то получится как на следующей схеме. Это часто используется для реальных электрических цепей, поэтому как следует запомните.



Я думаю, что теперь вы почти освоили основы трёхфазного переменного тока. Попробуйте решить проверочную задачу?



Конечно, попробуем!



ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК



Задача 1 Имеется цепь из трёх сопротивлений r_1 , r_2 и r_3 , соединённых «треугольником» (рис. 1). Для данной цепи построена эквивалентная схема из трёх сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 , соединённых «звездой» (рис. 2). Найти сопротивление R_1 .

Кроме того, найти сопротивление r_1 для случая обратного преобразования: от соединения «звездой» (рис. 2) к соединению «треугольником» (рис. 1).



Начну со случая пересчёта «треугольника» в «звезду». В этом случае должны быть равны между собой общие сопротивления обеих цепей (исходной и эквивалентной) для всех пар выводов – a и b , b и c , и c и a . Это означает выполнение следующих тождеств:

$$\text{для пары выводов } a \text{ и } b: R_1 + R_3 = r_3(r_1 + r_2)/(r_1 + r_2 + r_3), \quad (1)$$

$$\text{для пары выводов } b \text{ и } c: R_2 + R_3 = r_2(r_1 + r_3)/(r_1 + r_2 + r_3), \quad (2)$$

$$\text{для пары выводов } c \text{ и } a: R_1 + R_2 = r_1(r_2 + r_3)/(r_1 + r_2 + r_3). \quad (3)$$

После некоторых преобразований получим

$$R_1 = r_3 r_1 / (r_1 + r_2 + r_3).$$

Теперь случай пересчёта «звезды» в треугольник. В этом случае расчёты будут проще, если использовать проводимости вместо сопротивлений. Аналогично предыдущему случаю, общие сопротивления между всеми парами выводов, то есть a и b , b и c , c и a , в исходной и эквивалентной схемах должны быть равны между собой. Мы будем попарно замыкать накоротко каждую пару выводов в обеих схемах и приравнять общие проводимости исходной и эквивалентной цепей. Когда мы замкнули выводы a и b , для общих проводимостей $a b \leftrightarrow c$ можно записать тождество:

$$(R_1 + R_3)/(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3) = 1/r_1 + 1/r_2. \quad (4)$$

Точно так же, замкнув выводы b и c , для $b c \leftrightarrow a$ имеем:

$$(R_2 + R_3)/(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3) = 1/r_1 + 1/r_3. \quad (5)$$

Рис. 1. Соединение «треугольником»

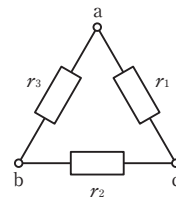
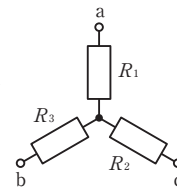


Рис. 2. Соединение «звездой»



Наконец, замкнув выводы c и a , для $c \leftrightarrow b$ можем записать

$$(R_1 + R_2)/(R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3) = 1/r_2 + 1/r_3. \quad (6)$$

Вычтя из тождества (4) тождество (6) и прибавив к результату тождество (5), получим

$$2R_3/(R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3) = 2/r_1,$$

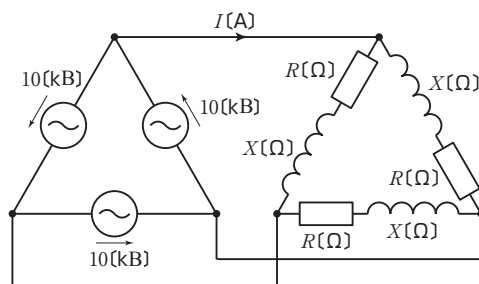
$$r_1 = (R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3)/R_3 [\text{Ом}] \quad \text{или} \quad r_1 = R_1 + R_2 + R_1R_2/R_3 [\text{Ом}].$$

Вот и всё. Ну как?



Я вижу, ты всё понимаешь. А под конец реши вот это.

Задача 2 Имеется цепь переменного тока, показанная на рисунке, в которой к симметричному 3-фазному источнику с фазным напряжением 10 кВ подключён симметричный 3-фазный приёмник, каждая фаза которого содержит активное сопротивление R Ом и индуктивное сопротивление X_L Ом. Суммарная мощность, потребляемая приёмником, равна 200 кВт, линейный ток (скалярная величина) равен 20 А. Найти значения R и X_L .

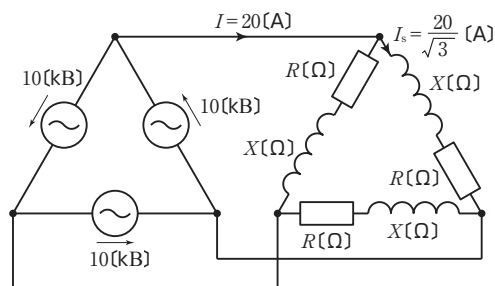


Как показано на схеме, фазный ток приёмника при соединении фаз «треугольником» в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного тока, то есть

$$I_\phi = I_\Delta / \sqrt{3} = 20 / \sqrt{3} \text{ А.}$$

Так как суммарная потребляемая мощность равна 200 кВт, значит, активная мощность, потребляемая одной фазой приёмника, будет равна

$$P_\phi = R(I_\phi)^2 = 200/3 \text{ кВт.}$$





Следовательно, сопротивление R фазы приёмника будет равно

$$\begin{aligned} R &= P_{\phi} / (I_{\phi})^2 = \\ &= (200000/3) / (20/\sqrt{3})^2 = \\ &= 500 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Обозначив фазное напряжение за E_{ϕ} , можно выразить через него импеданс Z_{ϕ} фазы приёмника:

$$\begin{aligned} Z_{\phi} &= E_{\phi} / I_{\phi} = \\ &= 10000 / (20/\sqrt{3}) = \\ &= 500\sqrt{3} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Искомое индуктивное сопротивление X_L находится так:

$$\begin{aligned} X_L &= \sqrt{(Z_{\phi})^2 - R^2} = \\ &= \sqrt{(500\sqrt{3})^2 - 500^2} = \\ &= 500\sqrt{2} \text{ Ом.} \end{aligned}$$



Молодец! Теперь тебе по плечу любая задача.



ИТАК,
ПОДГОТОВКА
ЗАКОНЧЕНА!



МАСТЕР ЁТА,
Я ГОТОВ БРОСИТЬ
ВЫЗОВ ЗАДАЧЕ.

ДУН



ГОСПОДА,
МОЖЕТ БЫТЬ
ВЫПЬЕМ ЧАЮ?

Я ПРИГОТОВИЛА
ЯБЛОЧНЫЙ
ПИРОГ
И ПЕЧЕНЬЕ.



ФЬЮЗ, ДАВАЙ
ЛУЧШЕ ЗАВТРА.

СЕГОДНЯ МЫ
БУДЕМ ПРАЗДНОВАТЬ
ВСТРЕЧУ С САЙКО.

ЯБЛОЧНЫЙ ПИРОГ
У НЕЁ ТАК
ХОРОШО
ПОЛУЧАЕТСЯ!



А-ХА-ХА

А-ХА-ХА



Ну что, Фьюз, ты готов?



Я всегда готов.



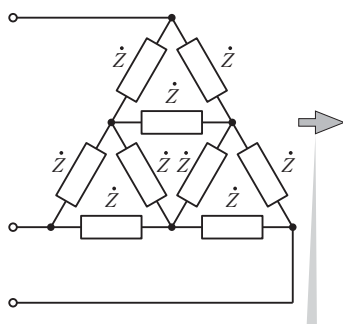
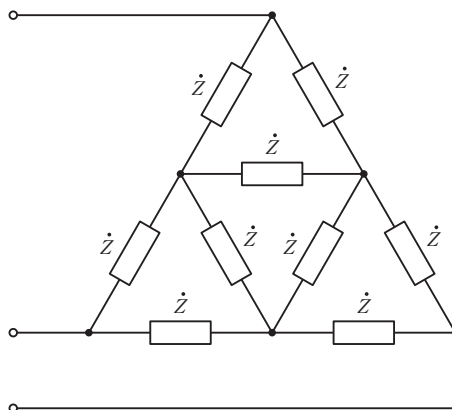
Задача написана вот на этом листочке.
«Найти общее сопротивление приёмника,
изображённого на схеме».



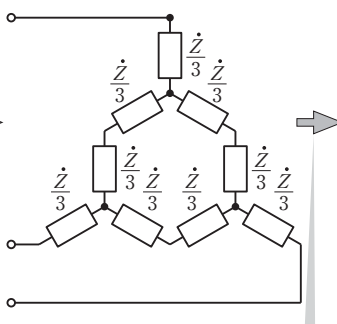
Мда... Интересная схема. Ответ можно
написать на этом же листочке?



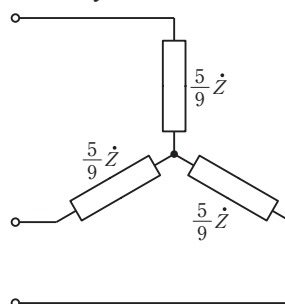
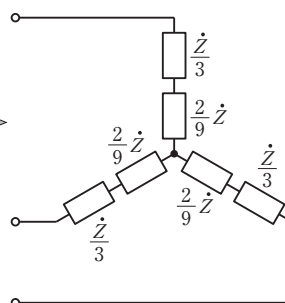
Да, пожалуйста.



Преобразуем внешние
«треугольники» в «звёзды»



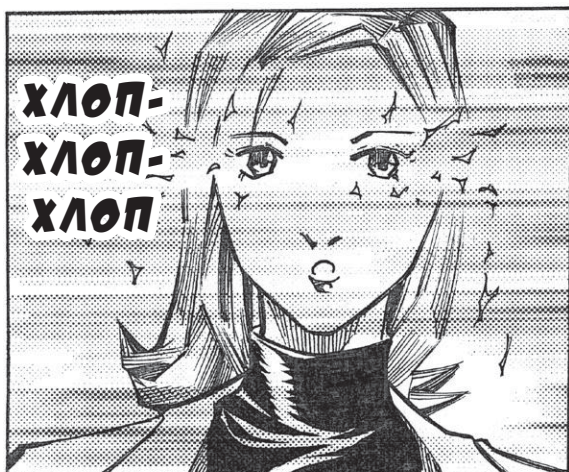
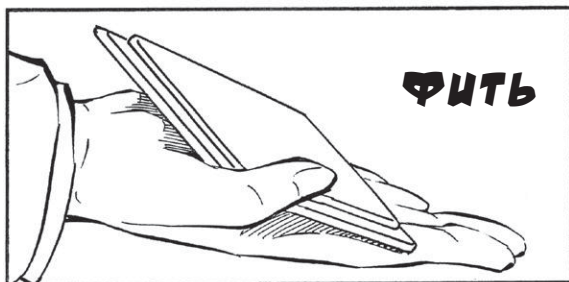
Преобразуем центральный
«треугольник» в «звезду»



Вот, готово. Ну как?



Замечательно. Ты хорошо научился.



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

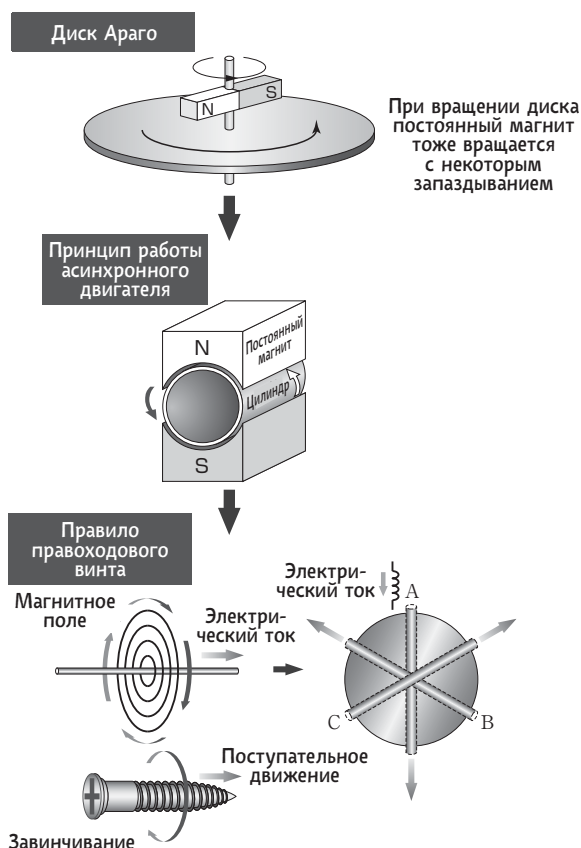
ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ИНВЕРТОРНАЯ СХЕМА

■ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

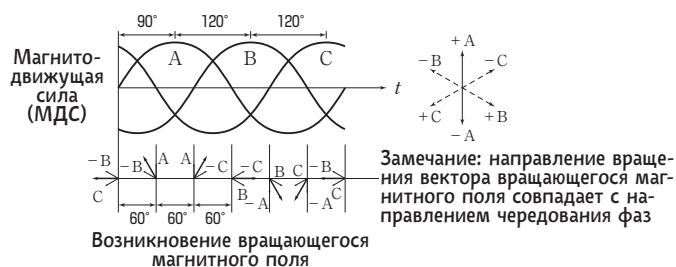
Если вращать диск Араго, то постоянный магнит с некоторым отставанием тоже будет вращаться.

Если вращать постоянный магнит или диск, то магнитное поле тоже будет вращаться. В этом заключается принцип действия асинхронного электродвигателя.

Далее, если разместить три катушки индуктивности (фазные обмотки) под углами 120° друг к другу и пропускать через них трёхфазный переменный ток, то их магнитные поля, аналогично току, будут изменяться по синусоидальному закону. Вектор суммарного магнитного потока будет вращаться с постоянной угловой частотой ω в направлении, зависящем от расположения фазных обмоток. (в случае, изображённом на этом рисунке – по часовой стрелке).

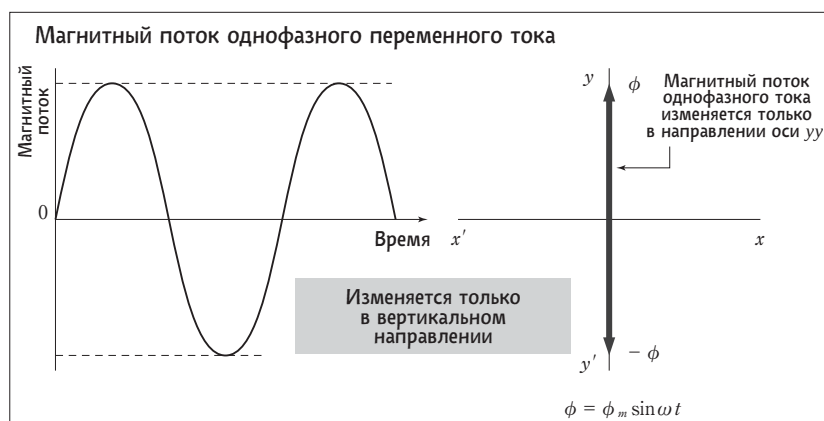


На графике показаны изменения МДС, создаваемые тремя фазными обмотками. Также внизу показаны направления МДС и их суммарного вектора через каждые 60° изменения фазы (когда одна из трёх МДС обращается в ноль)

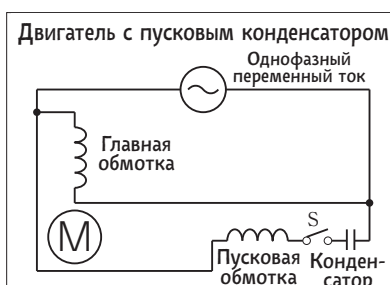
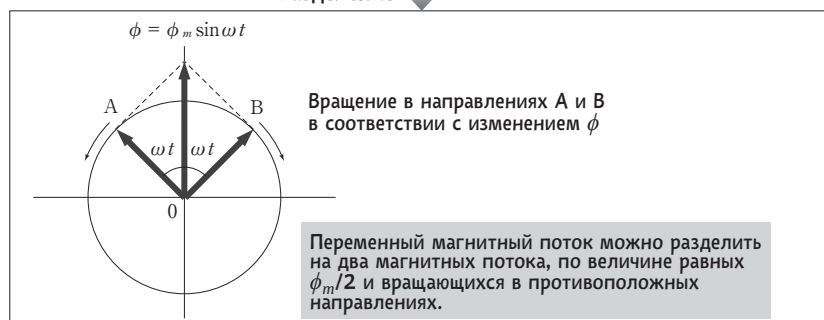


Почему вращается однофазный двигатель переменного тока?

В такой бытовой технике, как вентиляторы, используются однофазные двигатели переменного тока, однако магнитное поле, создаваемое однофазным переменным током, хотя и является переменным, само по себе вращаться не будет. Однако его можно условно разделить на два магнитных потока, по величине равных $\frac{1}{2}$ исходного и вращающихся в противоположные стороны. Если под действием внешней силы произвести запуск ротора в одном из направлений, то магнитное поле будет продолжать вращаться в этом же направлении. Поэтому такие двигатели для раскручивания снабжаются «автоматическими пусковыми устройствами» в зависимости от типа которых бывают «двигатели с экранированными полюсами», «с пусковым конденсатором» и т.д.



Разделение

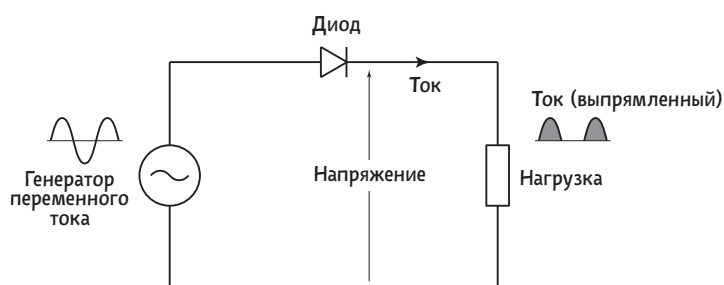


■ ИНВЕРТОР

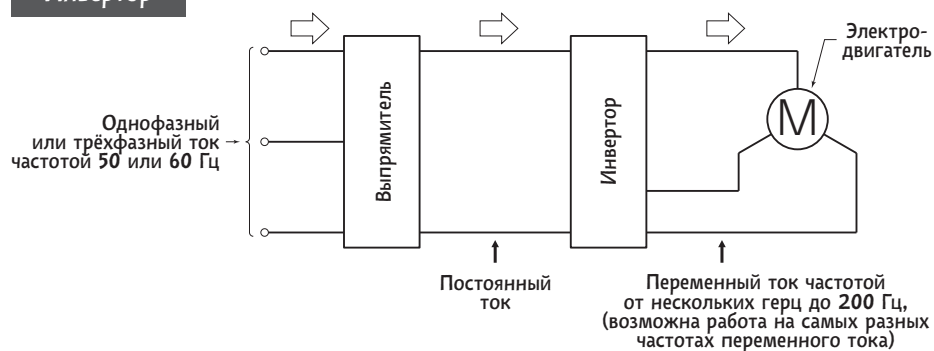
Так как диод пропускает ток только в одном направлении, в цепях с использованием диодов можно превращать переменный ток в постоянный. Это устройство называют выпрямителем.

Используя этот выпрямитель наоборот, можно превращать постоянный ток в переменный. Такое устройство называется инвертором. С помощью инвертора можно свободно управлять частотой выходного переменного тока, поэтому он используется во многих электроприборах, таких как кондиционеры воздуха, пылесосы, например, для регулирования числа оборотов электродвигателя.

Схема с диодом



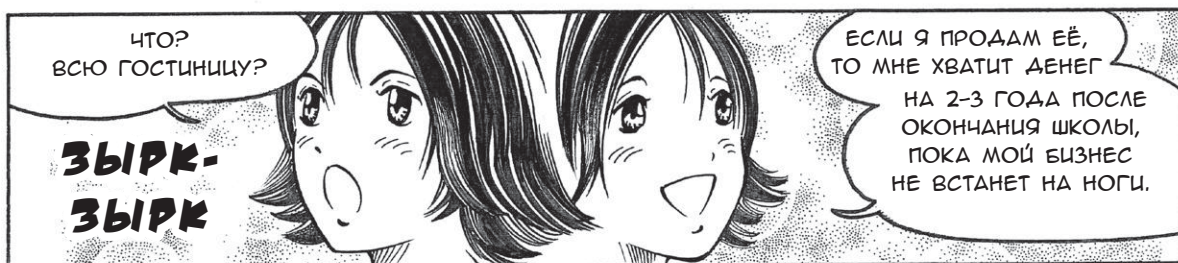
Инвертор

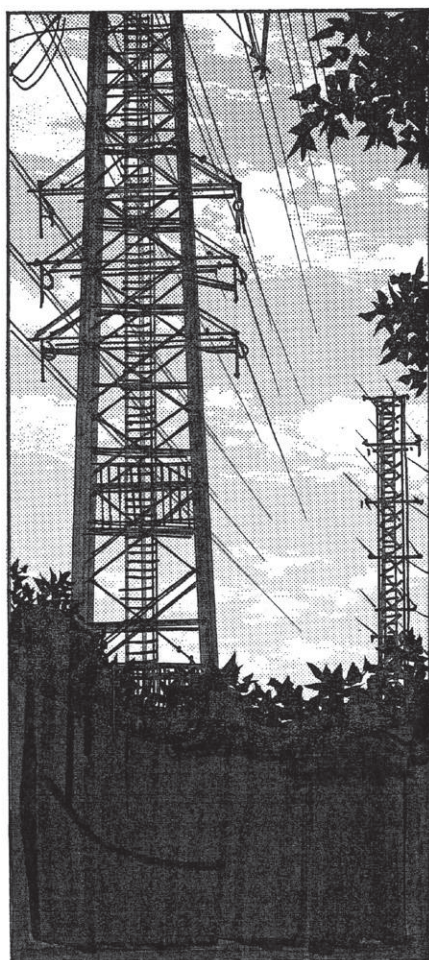
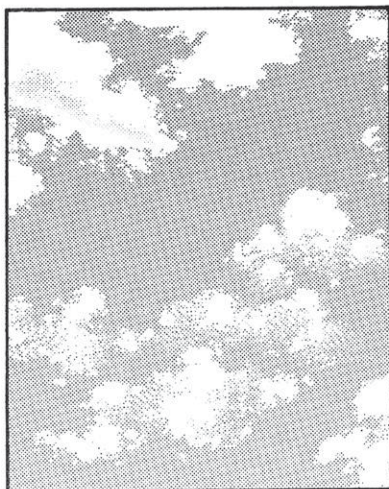


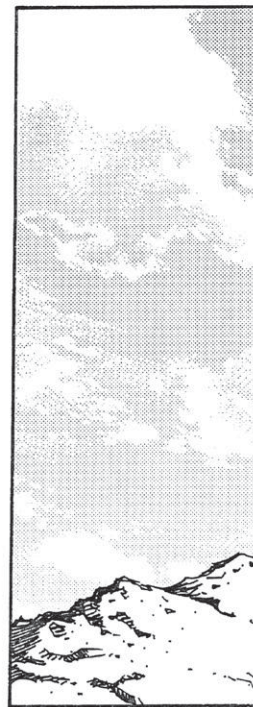
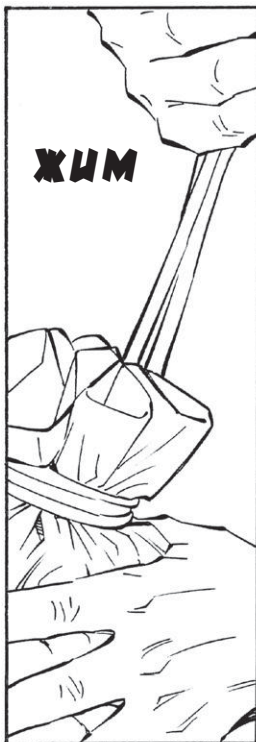
ГЛАВА 5

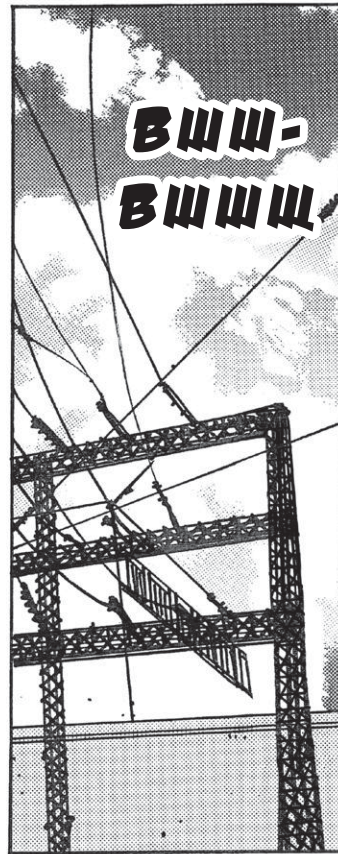
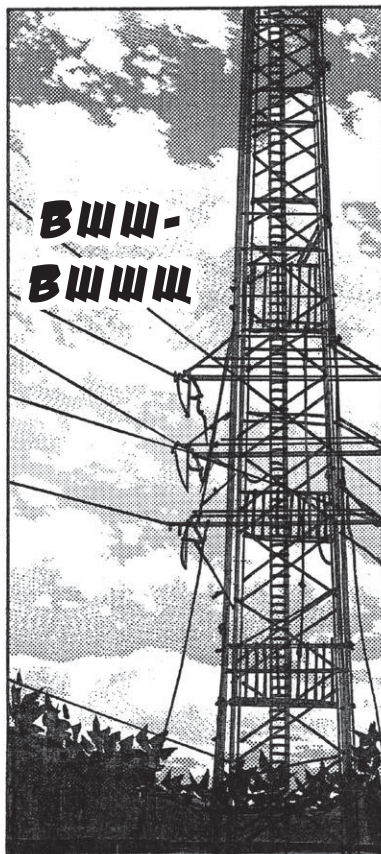
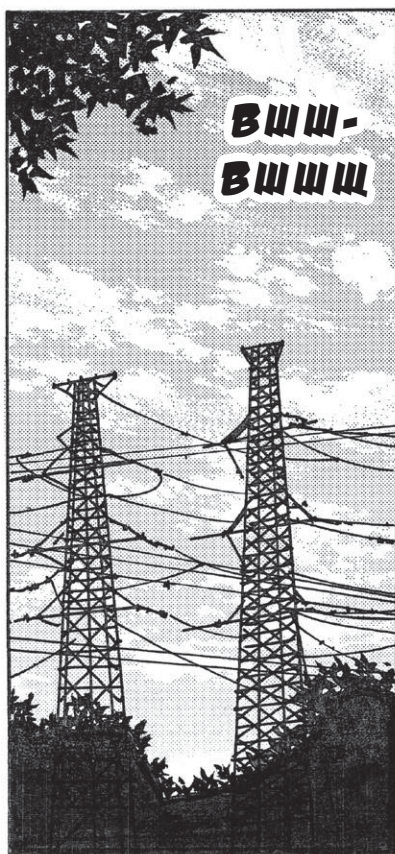
ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА













ЛЕКЦИЯ МАСТЕРА ЁТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ СИЛЫ (6)

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА



В этой лекции мы изучим такую новую для вас вещь, как трансформатор. Электричество, вырабатываемое на электростанциях, не очень высокого напряжения. Ну где-то всего 6,6 кВ, или там 11 кВ. В передаче этого электричества на большие расстояния важную роль играют трансформаторы. Есть даже линии электропередачи напряжением 500 000 В.

Производительность электростанции обычно выражается мощностью производимой электроэнергии, которую рассчитывают по формуле:

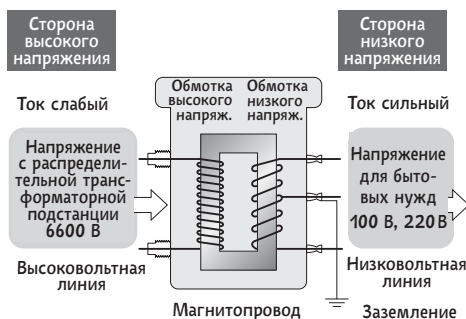
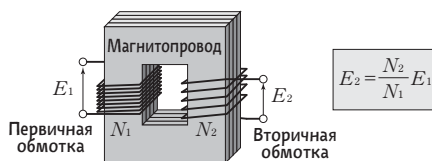
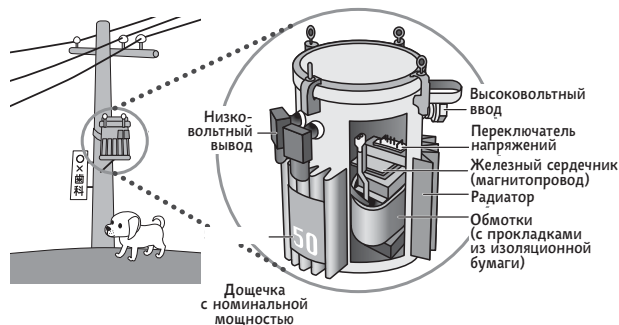
$$P = EI$$

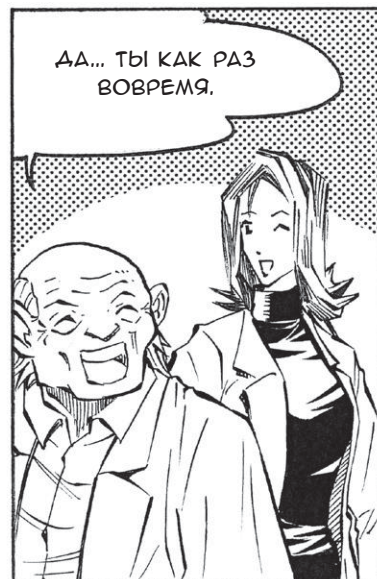
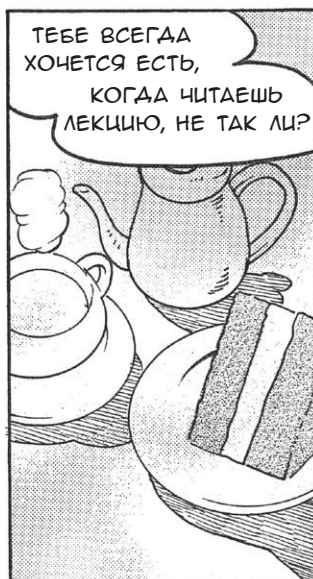
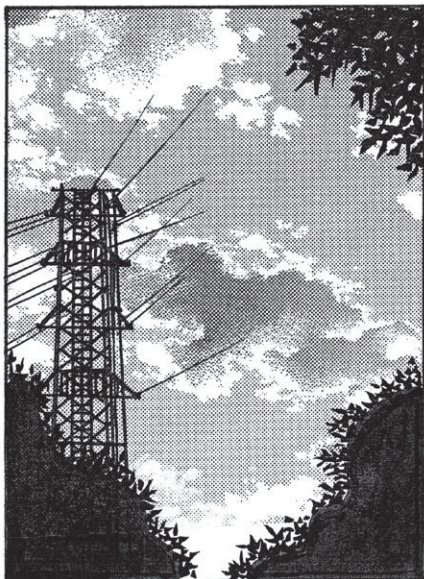
Из неё следует, что если при электропередаче увеличить напряжение, то ток можно будет снизить. Снижение тока позволяет уменьшить потери передачи. Поэтому сначала с помощью трансформатора повышают напряжение, затем электроэнергию передают, и в конце с помощью трансформатора понижают напряжение и подают электроэнергию потребителям. Для трансформаторов выполняется следующее отношение. Если обозначить число витков в первичной обмотке за N_1 , а во вторичной обмотке – за N_2 , то напряжение на вторичной обмотке E_2 можно будет найти по формуле:

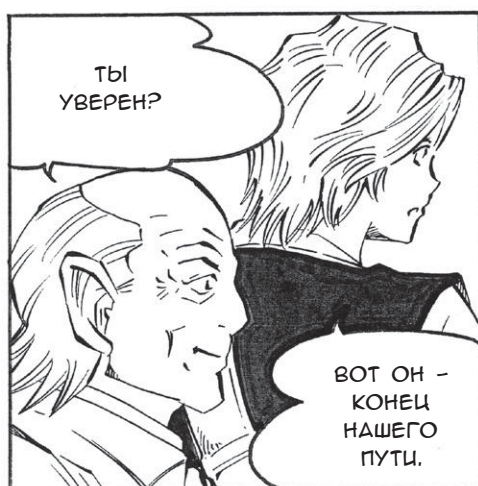
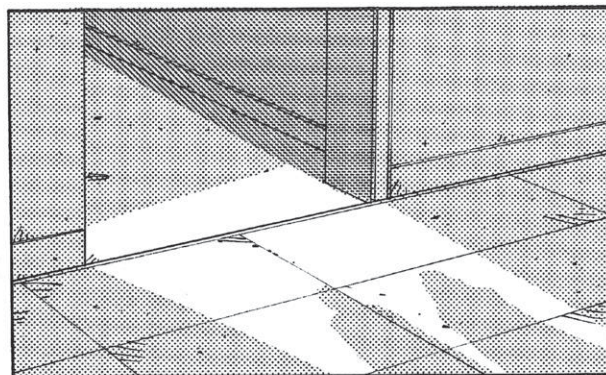
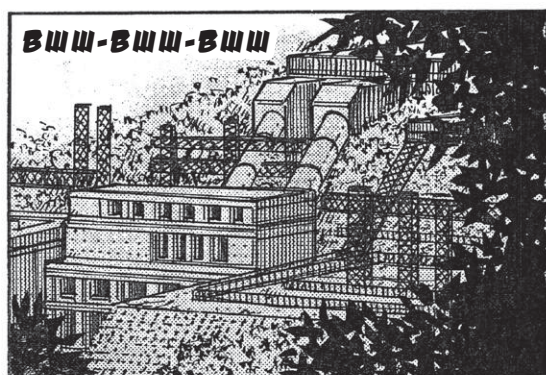
$$E_2 = E_1 N_2 / N_1$$

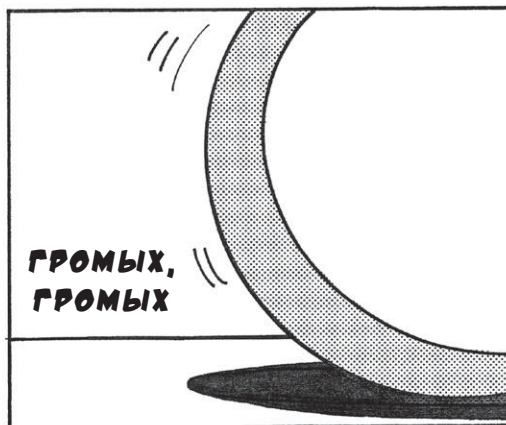
(где E_1 = напряжение на первичной обмотке).

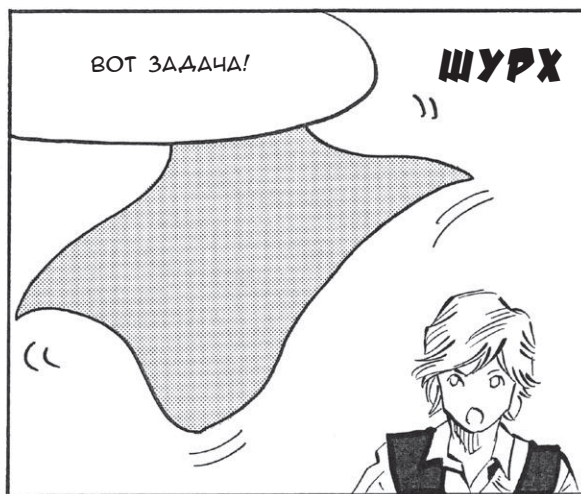
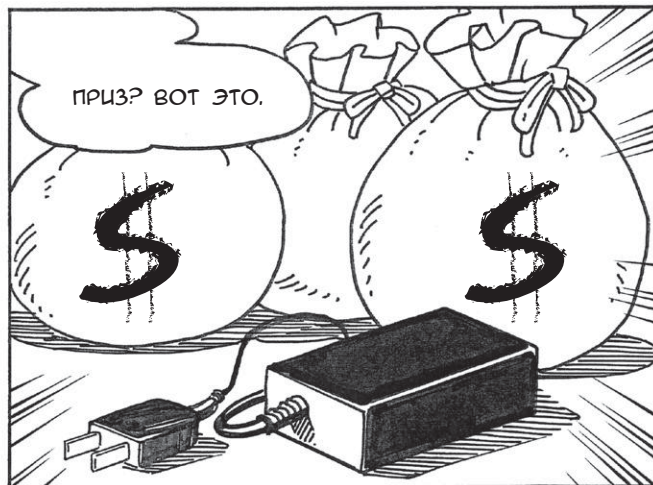
Кроме того, для уменьшения потерь линии электропередачи также снабжаются различными приспособлениями. Основной причиной потерь передачи является расход мощности, вызванный сопротивлением провода, однако это сопротивление зависит от некоторых факторов. Оно прямо пропорционально длине линии электропередачи и обратно пропорционально площади поперечного сечения провода. Поэтому принимаются такие меры, как увеличение площади поперечного сечения проводов, использование материалов с низким удельным сопротивлением. Проводятся также исследования применения такого явления, как сверхпроводимость.













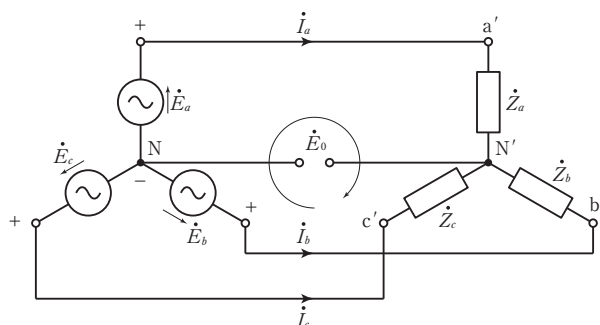
Это асимметричная трёхфазная цепь. Найди E_0 !



Ой, что это? Мм...



(Правила Кирхгофа, правила Кирхгофа...)



Ах, вот оно что?! Значит, можно использовать правила Кирхгофа...

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0,$$

$$\dot{Z}_a \dot{I}_a - \dot{Z}_b \dot{I}_b = \dot{E}_a - \dot{E}_b,$$

$$\dot{Z}_b \dot{I}_b + \dot{Z}_c (\dot{I}_a + \dot{I}_b) = \dot{E}_b - \dot{E}_c.$$

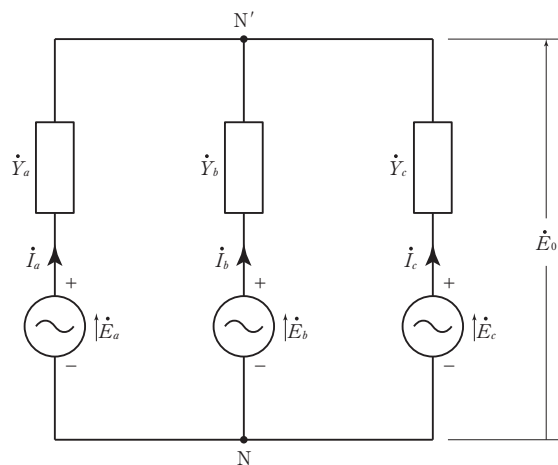
ЭТО ДОЛЖНЫ РЕШИТЬ ВЫ САМИ!

Напряжение E_0 между нейтральными точками

$$E_0 = \dot{E}_a - \dot{Z}_a \dot{I}_a.$$

Так правильно?!

Используйте теорему Миллмана



$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \frac{\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c} \\ &= \frac{\dot{E}_a \dot{Y}_a + \dot{E}_b \dot{Y}_b + \dot{E}_c \dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c} \end{aligned}$$

Теорема Миллмана

Напряжение $E_0 = \frac{\text{Ток между замкнутыми накоротко } N \text{ и } N'}{\text{Сумма проводимостей всех ветвей}}$ [В]

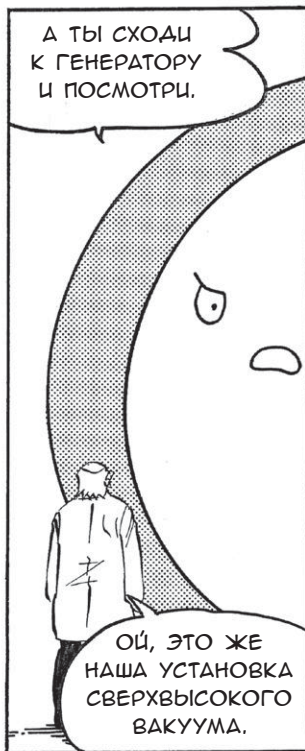


ММ.. ВАША
ПОБЕДА.

**ГРОМЫХ,
ГРОМЫХ**

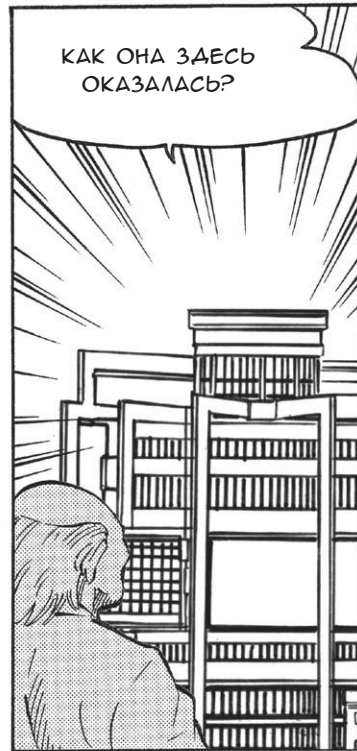


ПОЧЕМУ ВЫ,
ДЕТАЛИ, КАК СЛЕДУЕТ
НЕ РАБОТАЕТЕ?

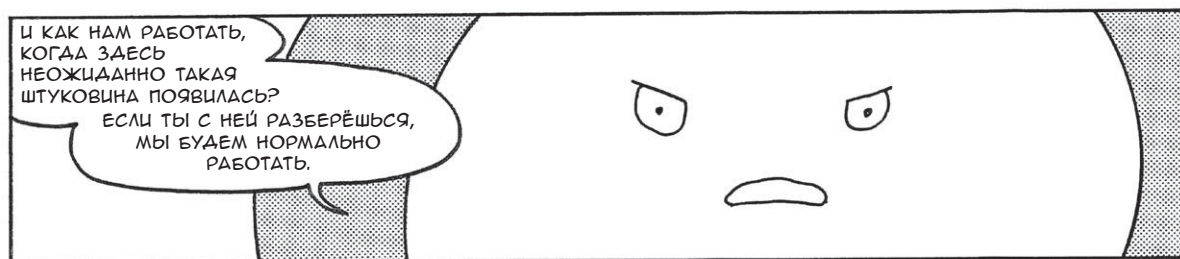


А ТЫ СХОДИ
К ГЕНЕРАТОРУ
И ПОСМОТРИ.

ОЙ, ЭТО ЖЕ
НАША УСТАНОВКА
СВЕРХВЫСОКОГО
ВАКУУМА.

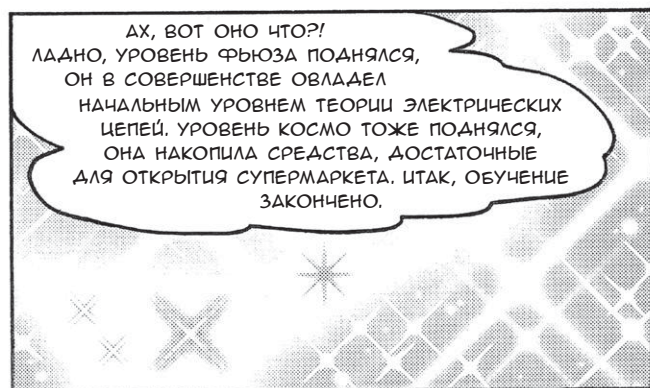


КАК ОНА ЗАЕСЬ
ОКАЗАЛАСЬ?



И КАК НАМ РАБОТАТЬ,
КОГДА ЗАЕСЬ
НЕОЖИДАННО ТАКАЯ
ШТУКОВИНА ПОЯВИЛАСЬ?

ЕСЛИ ТЫ С НЕЙ РАЗБЕРЁШЬСЯ,
МЫ БУДЕМ НОРМАЛЬНО
РАБОТАТЬ.



АХ, ВОТ ОНО ЧТО?!
ЛАДНО, УРОВЕНЬ ФЬЮЗА ПОДНЯЛСЯ,
ОН В СОВЕРШЕНСТВЕ ОВЛАДЕЛ
НАЧАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЦЕПЕЙ. УРОВЕНЬ КОСМО ТОЖЕ ПОДНЯЛСЯ,
ОНА НАКОПИЛА СРЕДСТВА, ДОСТАТОЧНЫЕ
ДЛЯ ОТКРЫТИЯ СУПЕРМАРКЕТА. ИТАК, ОБУЧЕНИЕ
ЗАКОНЧЕНО.



ТЕПЕРЬ ПРИДЁТСЯ ДУМАТЬ,
ЧТО ДЕЛАТЬ С ЭТОЙ
УСТАНОВКОЙ СВЕРХ-
ВЫСОКОГО ВАКУУМА.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

■ УМНЫЕ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Умные сети электроснабжения – это попытка добиться максимальной эффективности подачи и потребления электрической энергии, когда путём управления электросетями с помощью информационных технологий эффективно используют объекты электрогенерации разнообразных типов – тепловой, гидравлической, атомной, а также ветровой, геотермальной, солнечной электрогенерации, и, кроме того, всесторонне контролируют потребление электроэнергии в жилых домах, офисах, на предприятиях.

Непрерывный мониторинг энергоснабжения и энергопотребления позволит мгновенно переключать источники питания и управлять подачей электроэнергии в соответствии с изменением нагрузки. Для этого необходимы также технологии, обеспечивающие стабильную взаимосвязь распределённых источников питания разных типов – солнечных батарей, систем ветровой электрогенерации и др. Кроме того, рассматривается также возможность зарядки электромобилей в ночное время, установка аккумуляторных батарей для запасаания электроэнергии. Другими словами, умные сети электроснабжения – это электросети будущего, которые позволят свести к минимуму потери электроэнергии в системах электропередачи и построить интеллектуальные сети электропередач с минимальными затратами.



■ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Передача электроэнергии на сверхвысоких частотах СВЧ – это концепция, согласно которой электроэнергию, вырабатываемую на электростанциях, вместо традиционной передачи по проводам преобразуют в высокочастотное электромагнитное излучение, передают в пространстве подобно сигналам сотовых телефонов и на приёмной станции вновь преобразуют в электрическую энергию. Ожидается, что подобные системы, помимо использования в системах космической солнечной электрогенерации, будут использоваться для передачи электроэнергии, например, роботам или электромобилям.

Система передачи электроэнергии на СВЧ состоит из подсистемы передачи (передатчика), подсистемы формирования и контроля СВЧ-луча (высокоточное устройство управления СВЧ-электропередачей), подсистемы приёма СВЧ и выпрямления. Ожидается, что технология передачи электроэнергии на СВЧ найдёт много различных применений, однако необходимо также изучить такие проблемы, как влияние на живые организмы, человека, окружающую среду, существующие системы связи.

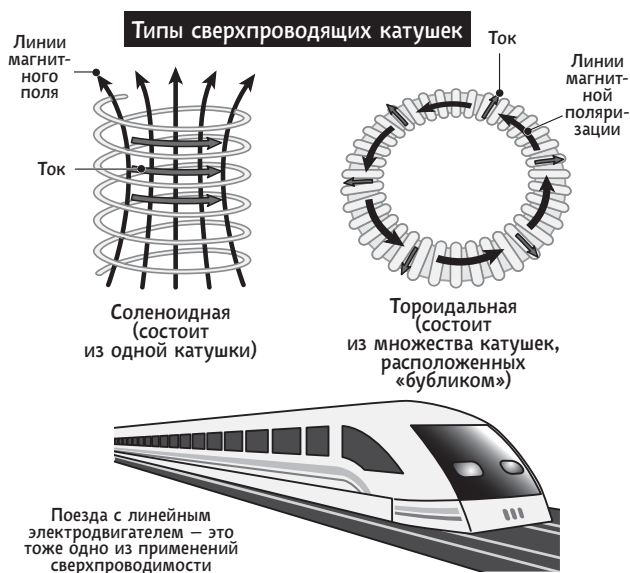
■ ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

В некоторых металлах наблюдается такое явление, как практически полное исчезновение сопротивления при очень сильном, почти до 0 К (-273°C), понижении температуры. Это называется сверхпроводимостью.

Так как электрическое сопротивление сверхпроводника по сути равно 0, при прохождении через него тока потерь не возникает. В связи с этим исследуется возможность различных применений этого явления – в сверхпроводящих магнитах для термоядерных реакторов и поездов на магнитной подушке, в сверхпроводниковых синхронных генераторах для поездов с линейным электродвигателем, в сверхпроводящих кабелях, сверхпроводящих трансформаторах и т. д.

При использовании сверхпроводимости благодаря возможности использования больших токов наряду с резким увеличением пропускной способности линий электропередач станет возможно уменьшить размеры и вес электроаппаратуры. Кроме того, благодаря отсутствию потерь возрастёт КПД. Для поддержания низкой температуры сверхпроводников используют, например, жидкий гелий.

Кроме того, существуют также накопители электроэнергии, основанные на сверхпроводимости. В них используется такое явление, что если через индуктивность L [Гн] пропустить постоянный ток I [А], то будет на-



коплена энергия магнитного поля, равная:

$$LI^2/2 \text{ [Дж]}$$

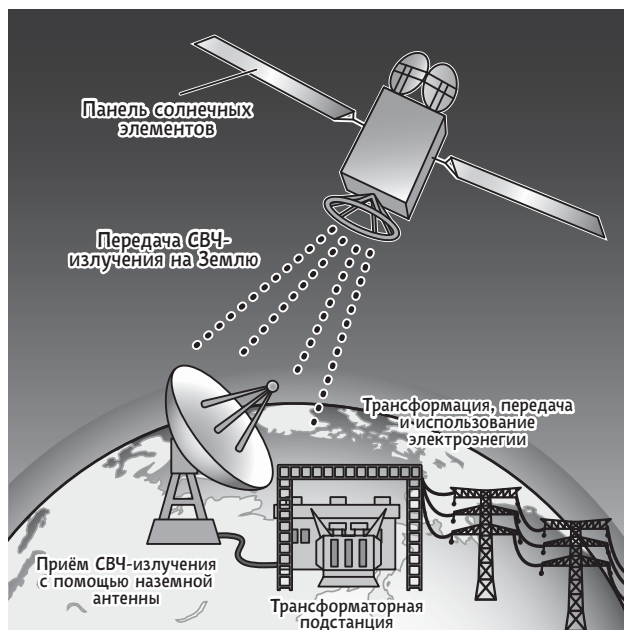
Если сделать провод катушки индуктивности сверхпроводником и закоротить его концы после пропускания тока, то по причине отсутствия потерь ток будет продолжать течь постоянно. Сверхпроводящая катушка по форме может быть либо соленоидной, либо тороидальной (кольцевой), состоящей из катушек, образующих «бублик».

Подобные сверхпроводящие аккумуляторы электроэнергии отличаются высоким КПД и скоростью срабатывания, поэтому их надеются использовать в энергосистемах для сглаживания пиковых нагрузок, стабилизации.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ

■ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ

Космическая солнечная электрогенерация – это система снабжения поверхности Земли электроэнергией с помощью солнечного энергетического спутника. Этот спутник будет нести на себе огромные панели солнечных элементов, воспринимающие мощную энергию солнечного излучения, которой переполнено околоземное космическое пространство. Система должна состоять из подсистем солнечной электрогенерации, преобразующей солнечное излучение в электроэнергию с помощью солнечных батарей, и подсистемы передачи электроэнергии на СВЧ, преобразующей выработанную электроэнергию в высокочастотное электромагнитное излучение, затем посылающей его на Землю с высокой точностью и принимающей его там с помощью антенны наземного или морского базирования. Использование энергии Солнца в космосе позволяет обеспечить гораздо более стабильную подачу электроэнергии, чем на поверхности Земли, так как в космосе нет влияния смены времени суток и погодных условий. В процессе снабжения электроэнергией не возникает углекислый газ, поэтому эта система рассматривается также как идеальная с точки зрения защиты окружающей среды.



Для реализации этой системы необходимы такие технологии, как космическая транспортировка, монтаж крупногабаритных конструкций, солнечная электрогенерация, передача электроэнергии на СВЧ, полупроводниковые технологии, робототехника, технологии передачи и распределения электроэнергии. Другими словами, эту систему можно создать, обобщив существующие в настоящее время технологии.

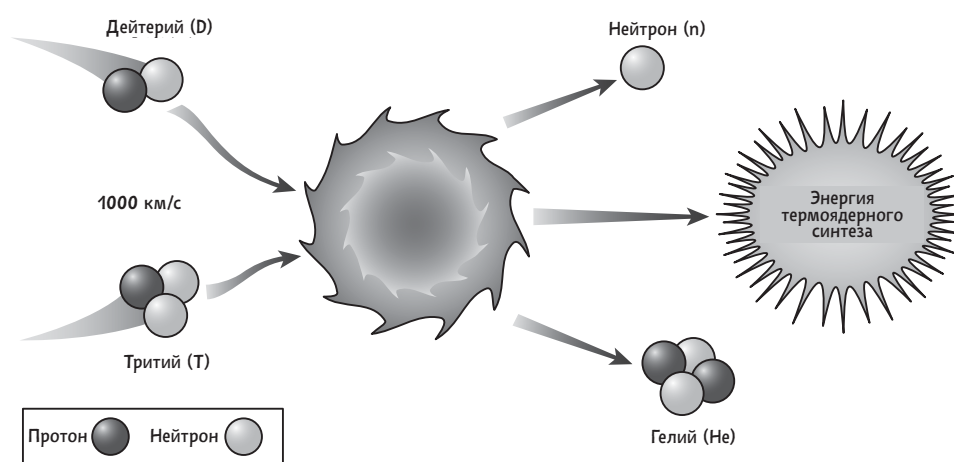
Подобная система способна поставлять мощность порядка 1 млн кВт, в этом случае понадобятся сооружения следующих размеров: две панели солнечных элементов $2 \text{ км} \times 4 \text{ км}$, приёмная антенна диаметром около 10 км. Кроме того, для реализации этого проекта необходимо решить такие задачи, как снижение затрат на космическую транспортировку, создание компактных, лёгких и обладающих более высоким КПД систем электрогенерации, а также провести отработку технологии передачи электроэнергии на СВЧ.

■ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

При термоядерном синтезе, происходящем в результате столкновений атомных ядер, выделяется огромное количество энергии. Электрогенерация термоядерного синтеза – это попытка превратить эту энергию в электроэнергию для последующего использования.

Термоядерный синтез – это слияние атомных ядер, имеющих положительный электрический заряд. Эти ядра взаимно отталкиваются, к тому же они окружены электронами, поэтому осуществить подобную реакцию непросто. Наиболее легко осуществимая реакция ядерного синтеза – это реакция слияния дейтерия D и трития T. Если разогнать их до сверхвысокой скорости около 1000 км/с и столкнуть между собой, то образуется гелий. При этом из 1 г дейтерия выделяется огромная энергия, эквивалентная энергии сжигания около 8 т каменного угля.

Состояние вещества, когда в результате ионизации под действием высокой температуры более $100\,000^\circ\text{C}$ атомные ядра и электроны существуют раздельно, называется плазмой. Для реализации ядерного синтеза необходимо поддерживать эту плазму при очень высокой температуре – около $600\,000\,000^\circ\text{C}$ для D–D реакции или около $100\,000\,000^\circ\text{C}$ для D–T реакции. Для того, чтобы плазма не прикоснулась к стенке термоядерного реактора, её необходимо удерживать. Исследуемые методы удержания плазмы можно разделить на две категории – удержание с помощью магнитного поля



и удержание с помощью сил инерции. Самый представительный метод удержания магнитным полем – реактор типа Токамак («ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками»), в котором плазма удерживается в кольцевой части, имеющей форму «бублика», с помощью комбинированного магнитного поля, создаваемого тороидальной катушкой и кольцевым током, пропускаемым через плазму.

Научные исследования в отдельно взятой стране не позволяют реализовать проект по причине как высокой стоимости, так и сложности технических задач, которые необходимо решить, поэтому в настоящее время проект развивается в рамках международного сотрудничества.

■ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В топливных элементах (ТЭ) используется метод прямой электрогенерации путём электрохимической реакции между водородом (топливом), полученным риформингом природного газа, метилового спирта, каменноугольного газа и др., и кислородом воздуха. Используемая реакция обратна реакции электролиза воды. Хотя выходная мощность невелика, КПД электрогенерации высок, составляя 40 – 60%, а при использовании отходящего тепла можно увеличить полный КПД до 80%. Несмотря на название «топливный элемент» это не означает сжигания топлива – при работе образуется мало таких продуктов, как Nox (нитраты) и SO_2 (диоксид серы), то есть топливные элементы отличаются также высокой экологичностью.

В зависимости от типа электролита ТЭ могут быть фосфорно-кислые, расплавные карбонатные, твёрдооксидные, полимерно-мембранные и др.

Раньше велись разработки больших ТЭ мощностью порядка 10000 кВт, однако в последнее время ведутся исследования компактных полимерно-мембранных ТЭ для использования в быту, в автомобилях.

■ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ

Солнечная электрогенерация – это метод прямой электрогенерации путём превращения солнечной энергии в электроэнергию с помощью солнечных элементов (солнечных батарей). В ней нет движущихся частей, она проста в обслуживании, также достоинством является модульная конструкция, позволяющая проектировать сооружения в соответствии со спросом, с рельефом местности. Солнечные элементы, которые называют также фотоэлементами, являются электроэнергетическими устройствами, преобразующими световую энергию непосредственно в электричество. Помимо наиболее распространённых кремниевых солнечных элементов, также реализованы солнечные элементы на основе полупроводников с использованием разнообразных химических соединений. Эти устройства позволяют производить электроэнергию в любом месте, где есть солнечное освещение, при этом КПД не зависит от размеров установки. Остаётся ещё решить некоторые задачи, например, снизить стоимость, повысить КПД преобразования, однако уже сейчас, в связи с необходимостью предотвращения глобального потепления, продвигается их активное внедрение.

Особенно стоит отметить, что недавно по инициативе энергетических компаний начались работы по реализации крупномасштабной солнечной электрогенерации Mega Solar мощностью порядка 20 000 кВт.

■ ВЕТРОВАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ

Ветровая электрогенерация – это метод, в котором электроэнергия генерируется с помощью энергии ветра, которая представляет собой чистую и неиссякаемую энергию, использовавшуюся с давних времён в виде мельниц, парусных кораблей. Хотя в качестве привода генератора наиболее часто используются ветровые турбины пропеллерного типа с горизонтальной осью, в некоторых случаях в зависимости от применения могут использоваться также вертикально-осевые ветровые турбины (ротор Дарье, гироскопическая ветровая турбина, ветровая турбина Савониуса и другие). В последнее время наметилась тенденция к укрупнению – в основном стали использоваться установки мощностью порядка 2500 кВт. Также изучается возможность создания в будущем ветроэнергетических установок морского базирования.

Достоинства ветровой электроэнергетики – это не только низкий уровень выброса парниковых газов, возможность продолжительного использования без всякого топлива, но также экономическая эффективность. Однако есть также и проблемы, требующие решения, например, нестабильность выходной мощности.

УСТРОЙСТВА, ПОТРЕБЛЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

■ ТЕПЛОВОЙ НАСОС

В воде и воздухе, существующих в природе, содержится много тепловой энергии, которую можно использовать. Подобно обычному насосу, выкачивающему воду, тепловой насос с малой затратой энергии выкачивает тепло для использования в целях, например, кондиционирования воздуха или нагрева воды.

Принцип действия теплового насоса основан на следующем. Холодильный агент, в качестве которого используется, например, углекислота (CO_2), подвергают сжатию и расширению, вызывающим его попеременное сжижение и испарение. Это приводит к резким изменениям температуры и к теплообмену с окружающим воздухом.

Эффективность теплового насоса выражают коэффициентом преобразования теплоты и обозначают COP (Coefficient Of Performance), он равен следующему:

$$\frac{\text{Мощность охлаждения или нагрева [Вт]}}{\text{Потребляемая электрическая мощность [Вт]}}$$

Например, COP=4 означает, что 1 Вт потребляемой электрической мощности обеспечивает мощность теплопереноса 4 Вт. По этой причине тепловой насос называют «козырем в борьбе с глобальным потеплением».

■ СВЕТОДИОДНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Существуют такие осветительные приборы, как лампы накаливания, люминесцентные лампы, однако в последнее время большое внимание привлекает светодиодное освещение, так как оно обладает замечательными характеристиками.

Что ни говори, основными преимуществами светодиодов являются долгий срок службы и компактные размеры. Кроме того, их свет хорошо заметен, поэтому их используют, например, в светофорах. Срок службы многих светодиодов составляет около 40 000 часов, то есть они прослужат 10 лет, даже если использовать их по 10 часов каждый день. Кроме того, их компактность позволяет создавать разнообразный дизайн. Спектр светодиодов почти не содержит ультрафиолетового и инфракрасного излучения, поэтому они хорошо подходят, например, для подсветки произведений искусства. Кроме того, они светятся под действием даже низкого напряжения, яркость их свечения можно регулировать. Раньше недостатком светодиодов было падение световой эффективности из-за нагрева, когда через них пропускали большой ток для получения более мощного излучения. Однако в последнее время благодаря прогрессу технологий их световая эффективность увеличилась и ожидается, что светодиоды, помимо всего прочего, внесут ещё больший вклад в энергосбережение. Считается, что в недалёком будущем всё освещение будет осуществляться при помощи светодиодов.

■ ИНТЕРНЕТ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

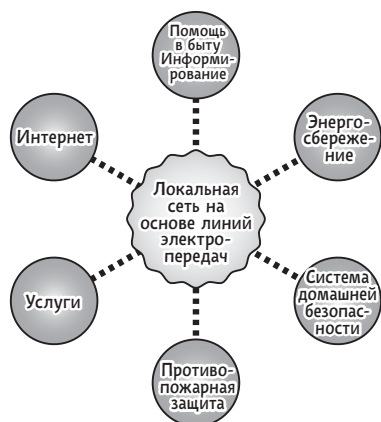
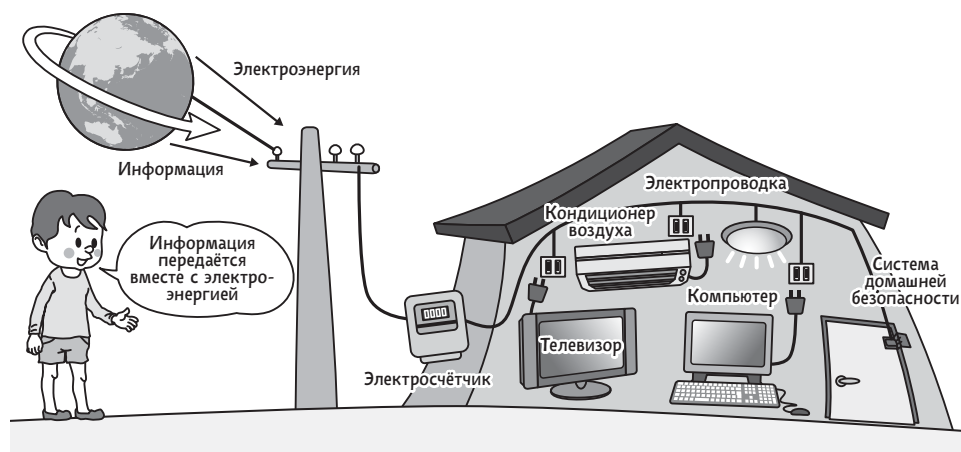
Это называется технологией высокоскоростной передачи данных по электрическим сетям (Power Line Communication: PLC). Кроме подключения к интернету, это даёт возможность управлять различными бытовыми электроприборами через электропроводку внутри жилых помещений.

Типичный метод принципиально заключается в том, что по обычным линиям электроосветительной сети вместе с синусоидальным переменным током передают информацию, называя это высокочастотной связью по линии электропередачи.

Далее, встроив в электросчётчик компьютер, предназначенный для предоставления различных услуг, можно управлять подключённой к розеткам бытовой электротехникой через внутреннюю электропроводку жилого дома.

Интернет по линиям электропередач — это не только интернет, но ещё и возможность легко построить так называемую домашнюю сеть с помощью внутренней электропроводки. Кроме того, это даёт возможность предоставления различных услуг, таких как автоматическая проверка исправности электрического и газового оборудования, функции домашней системы безопасности, информирование об энергосбережении и т. п.

В некоторых странах ведутся разработки высокоскоростной передачи данных интернета в жилые дома с помощью, например, высоковольтных линий, однако в Японии по таким причинам, как помехи в линиях электропередач, ослабление сигнала, в настоящее время для этих целей разрешается использовать только внутреннюю электропроводку.



С помощью электрической сети возможно предоставление различных услуг на основе объединения электроэнергии и информации



ЛЕКЦИЯ МАСТЕРА ЁТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СИЛЫ (7)

ТЕРМИНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ



■ ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Электрический заряд	Наличие электричества в веществе называется электризацией, а количество этого электричества — электрическим зарядом
Ионы	Наэлектризованные атомы. Атомы по своей природе нейтральны, однако в результате увеличения или уменьшения числа электронов электризуются либо положительно (положительные ионы), либо отрицательно (отрицательные ионы)
Электрическое поле	Это область пространства, в которой действует электростатическая сила. Полное название — электростатическое поле
Магнитное поле	Это область пространства, в которой действует магнитная сила. Магнитную силу обозначают с помощью магнитных силовых линий, которые выходят из полюса N и входят в полюс S.
Электро-магнитная сила	Это сила взаимодействия между магнитным полем и электрическим током. Направление этой силы определяется по правилу левой руки Флеминга
Электро-магнитная индукция	Это явление возникновения электродвижущей силы (ЭДС) в катушке индуктивности при изменении магнитного потока, проходящего через сечение этой катушки. Направление этой ЭДС определяется по правилу правой руки Флеминга
Электродвижущая сила (ЭДС)	Это сила, вызывающая появление разности потенциалов и заставляющая ток протекать непрерывно
Напряжение	Величина, выражающая способность источника питания создавать ток
Потенциал	Это напряжение в какой либо точке, измеренное относительно нулевого провода
Падение напряжения	Когда через элемент цепи протекает ток, потенциал точки выхода тока из этого элемента становится ниже, чем потенциал точки входа. Величину этого снижения называют падением напряжения, а на выводах элемента возникает разность потенциалов, численно равная падению напряжения.
Разность потенциалов	Это разность между потенциалами в двух каких-либо точках цепи, другими словами, это синоним напряжения
Источник	Это устройство, создающее напряжение для того, чтобы вызвать непрерывный ток, например, электрическая батарея или электрогенератор.
Проводник	Вещество, в котором можно вызвать прохождение тока. Вещества, в которые не пропускают ток, называются изоляторами.
Приёмник (нагрузка)	Устройство, преобразующее электрическую энергию в другие виды, например в тепловую энергию
Последовательное соединение	Метод соединения например, электрических приборов, при котором они включаются в цепь одно за другим в одну линию
Параллельное соединение	Метод соединения, например, электрических приборов, при котором их выводы объединяются в два пучка
Переменный ток	Это электричество, используемое, например, в быту, на предприятиях, у которого направление и величина напряжения и тока периодически меняются.
Частота	Это величина, показывающая сколько циклов переменного тока происходит за 1 секунду. В восточной части Японии она равна 50 Гц, в западной — 60 Гц
Период	Это время, за которое переменный ток совершает 1 цикл.
Действующее значение	Действующее значение переменного тока — это величина постоянного тока, вызывающего эквивалентное тепловыделение, то есть когда в тот же промежуток времени на таком же сопротивлении выделяется равное количество тепла.



■ ПРАКТИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ

Заземление	Подключение электрической цепи или части электрооборудования к проводу, соединённому с землей. Это делается для предотвращения электротравм и сохранности оборудования
Воздушная линия электропередачи	Электрические провода, подвешенные в воздухе, например, на электрических столбах.
Короткое замыкание	Соединение напрямую двух точек цепи с разными потенциалами.
Пробой на землю (короткое замыкание на землю)	Неисправность, при которой обладающая ненулевым потенциалом часть цепи электрически соединяется с землей.
Распределение электроэнергии	Передача электроэнергии от распределительной электроподстанции к потребителям
Электрический разряд	Это явление протекания тока через воздух. Газы в основном являются изоляторами и не пропускают электричество, но если, например, сильно поднять напряжение, то ток будет протекать.
Электроэнергетическая система	Полный путь от производства электроэнергии до её конечного потребления. Состоит из электростанций, линий электропередачи, трансформаторных подстанций, системы распределения электроэнергии
Прерыватель	Устройство, отключающее часть цепи во время её работы или при неисправности
Молние-защитный разрядник	Устройство, защищающее электроэнергетическое оборудование от повышения напряжения в результате молнии
Одно-проволочный провод	Электрический провод, в котором используется одна проволока круглого сечения
Много-проволочный провод	Электрический провод, в котором используется от нескольких штук до нескольких десятков штук проволочек, обычно скрученных между собой.
Линейный изолятор	Устройство, изолирующее провода от опор при подвешивании проводов на электрических столбах, опорах воздушной линии электропередачи и т. п. Представляет собой изолятор, изготовленный, например, из фарфора или стекла.
Допустимый ток	Этот наибольшее значение тока, которое может непрерывно протекать по проводу, не повреждая его. Определяется такими факторами, как физические свойства проводника, допустимая температура нагрева изоляции провода, состояние оборудования линии и др.
Избыточный ток	Это ток, превышающий возможности, например, электрических машин и приборов, проводов. Может быть током перегрузки или током короткого замыкания.
Плавкий предохранитель	Устройство, защищающее электрические машины и приборы от избыточного тока. Состоит из проводящей плавкой вставки, которая плавится при прохождении через неё избыточного тока
Инвертор	Устройство, преобразующее постоянный ток в переменный. Используется, например, в кондиционерах воздуха, преобразователях частоты.
Конвертор-выпрямитель	Устройство, преобразующее переменный ток в постоянный, либо изменяющее частоту переменного тока с 50 Гц на 60 Гц.



■ СИМВОЛЫ ГРЕЧЕСКОГО АЛФАВИТА

В теории электрических цепей и в основанных на ней расчётах используется много букв греческого алфавита. Однако несмотря на большое количество, запомнить их несложно – ведь здесь нет никакой грамматики.

Пр. б. – прописные буквы

Стр. б. – строчные буквы

Рус. – русское название, используемое в научно-технических дисциплинах*

Пр. б.	Стр. б.	Рус.*	Основные применения
Α	α	Альфа	Углы, коэффициенты, площади
Β	β	Бета	Углы, коэффициенты
Γ	γ	Гамма	Углы, относительный вес, удельная электропроводность
Δ	δ	Дельта	Малые приращения, плотность
Ε	ε	Эпсилон	(строчная), диэлектрическая проницаемость, малые величины
Ζ	ζ	Дзета	(прописная) полное сопротивление, вертикальная ось**
Η	η	Эта	(строчная) КПД, коэффициент потерь на гистерезис
Θ	θ	Тета	Углы, постоянная времени
Ι	ι	Йота	
Κ	κ	Каппа	(строчная) диэлектрическая проницаемость
Λ	λ	Лямбда	(строчная) удельная электропроводность, длина волны
Μ	μ	Мю	(строчная) магнитная проницаемость, коэффициент усиления вакуумной электронной лампы, приставка «микро»
Ν	ν	Ню	(строчная) удельное магнитное сопротивление
Ξ	ξ	Кси	
Ο	ο	Омикрон	
Π	π	Пи	Число π (отношение длины окружности к длине её диаметра) (3.14159...), мера угла
Ρ	ρ	Ро	Удельное электрическое сопротивление
Σ	σ	Сигма	(Прописная) знак суммирования величин, (строчная) удельная электропроводность
Τ	τ	Тау	Постоянная времени
Υ	υ	Ипсилон	
Φ	φ	Фи	(прописная) Магнитный поток, (строчная) поток вектора напряжённости электрического поля, разность фаз
Χ	χ	Хи	(прописная) реактивное сопротивление
Ψ	ψ	Пси	Поток вектора напряжённости электрического поля, разность фаз, угловая скорость
Ω	ω	Омега	(прописная) обозначение единицы измерения сопротивления (Ом), (строчная) угловая частота = $2\pi f$

* В России принятое в науке и технике произношение некоторых греческих букв отличается от оригинального произношения на греческом языке (*прим. перев.*)

** В трёхмерной декартовой системе координат (*прим. перев.*)



■ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Одной из практических систем единиц измерения физических величин, которая разрешена к использованию почти во всех странах мира, а во многих странах является обязательной к использованию, является Международная система единиц физических величин – система СИ*. Это – современный вариант метрической системы, созданной во Франции. Прежде всего, в системе СИ есть 7 основных и 2 вспомогательные единицы** измерения. (К вспомогательным единицам относятся мера плоского угла радиан (рад), используемый, например, для выражения фазных углов; а также мера телесного угла – стерadian (ср). Далее, есть ещё производные единицы измерения, которые являются комбинацией основных единиц. Семнадцать из производных единиц названы в честь, например, учёных, которые ввели их в употребление – в сокращённой форме такие единицы принято писать с заглавной буквы, как например, Гц (герц). При выражении очень малых или очень больших величин для уменьшения количества нулей в записи используются так называемые приставки СИ, используемые для получения кратных или дольных единиц умножением основной единицы на десять в целой степени. Например, приставка «кило» соответствует умножению основной единицы на 1000, то есть 10^3 . Поэтому величина, в 1000 раз большая, чем метр, называется километром. Приставка «нано» из популярных в последнее время нанотехнологий означает умножение основной величины на 10^{-9} , то есть соответствует 1/1 000 000 000 (одной миллиардной) доле основной величины.

Производные единицы СИ для измерения электромагнитных величин

1 вольт (В)	Это напряжение, вызывающее в электрической цепи ток 1 А при мощности 1 Вт
1 фарад (Ф)	Это электрическая ёмкость такого конденсатора, в котором заряд 1 Кл создаёт между обкладками напряжение 1 В.
1 генри (Гн)	Это индуктивность такого замкнутого контура, в котором изменение тока с постоянной скоростью 1 А/с создаст ЭДС 1 В.
1 вебер (Вб)	Это такой магнитный поток, пересекающий одновитковый контур, который создаст в этом контуре ЭДС 1 В, если будет с постоянной скоростью уменьшен до нуля за секунду.
1 вольт-ампер реактивный (вар)	Реактивная мощность, возникающая в нагрузке в том случае, если при приложении к нагрузке синусоидального напряжения 1 В*** в ней протекает синусоидальный ток 1 А***, отстающий по фазе от напряжения на $\pi/2$.
1 вольт-ампер (В·А)	Полная мощность, возникающая в нагрузке в том случае, если при приложении к нагрузке синусоидального напряжения 1 В*** в ней протекает синусоидальный ток 1 А***.

* От франц. Le système international d'unités : SI (*прим. перев.*)

** Устаревшая информация. Вспомогательные единицы СИ, к которым ранее относили радиан и стерadian, отменены в 1995 году постановлением Генеральной конференции по мерам и весам (CGPM). В настоящее время радиан (м/м) и стерadian (м²/м²) относятся к безразмерным производным единицам. (*прим. перев.*)

*** Имеются в виду действующие значения (*прим. перев.*)

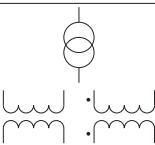
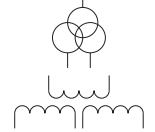
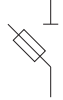


■ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Обозначения, используемые на электрических схемах, определены в стандарте IIS C 0617. Ниже я приведу самые типичные обозначения – постарайтесь научиться писать их самостоятельно.

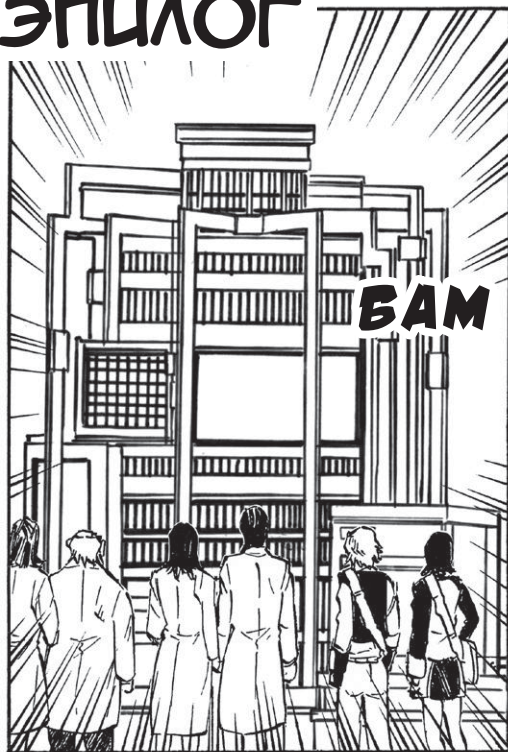
Обозначение	Описание
	Постоянный ток
	Переменный ток. Примеры:
	переменный ток 50 Гц;
	диапазон частот переменного тока 100 – 600 кГц
	Заземление (в общем случае)
	Заземление на корпус, «масса». Корпус или «масса» сокращённо обозначаются толстой косой штриховкой
	Идеальный источник тока
	Идеальный источник напряжения
	Неисправность (предполагаемая точка неисправности)
	Перекрытие или пробой изоляции
	Точка или место соединения
	Асинхронный трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором
	Электроизмерительные приборы. Звёздочка замещается одним из нижеперечисленных пунктов: буквенное обозначение единицы измерения – основной, кратной или дольной; буквенное обозначение измеряемой величины; химическая формула; графическое обозначение
	Ваттметр
	Омметр

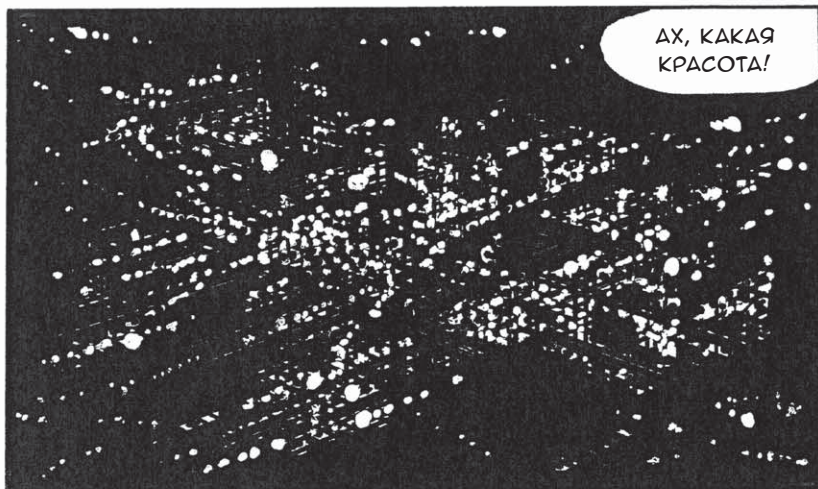
[Выдержка из IIS C 0617]

	Осветительные и сигнальные лампы: IN – лампа накаливания; Ne – неоновая лампа; EL – люминесцентная лампа; Hg – ртутная лампа
	Полупроводниковый диод (общее обозначение)
	Светодиод (LED) (общее обозначение)
	Резистор (общее обозначение)
	Переменный резистор
	Конденсатор
	Конденсатор переменной ёмкости
	Индуктивность, катушка индуктивности, дроссель без сердечника, токоограничивающий реактор. Пример: Катушка индуктивности с сердечником (магнитопроводом)
	Двухобмоточный трансформатор. Пример: Двухобмоточный трансформатор (точками показаны начала обмоток)
	Трёхобмоточный трансформатор
	Гальванический элемент, аккумуляторный элемент. (длинной линией обозначают положительный полюс «+», а короткой – отрицательный «-»)
	Предохранитель (общее обозначение)
	Предохранитель-выключатель
	Предохранитель-разъединитель
	Искровой промежуток
	Разрядник

[Выдержка из JIS C 0617]

ЭПИЛОГ





АХ, КАКАЯ
КРАСОТА!



ВСЁ ТАКИ ХОРОШО,
КОГДА ОГНИ
ЗАЖИГАЮТСЯ.



СМОТРИТЕ,
В НАШЕЙ ДЕРЕВНЕ
ТОЖЕ ГОРИТ СВЕТ!

И ВСЁ ЭТО
БЛАГОДАРЯ
НАШИМ ТРУДАМ.



АА, МЫ
ПОСТАРАЛИСЬ
НА СЛАВУ.



К ТОМУ ЖЕ МЫ
ТЕПЕРЬ ГОРАЗДО
БОЛЬШЕ ЗНАЕМ
ПРО ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ЦЕПИ.



АА, ОЧЕНЬ
КРАСИВО.

РЭЙ, ЕСЛИ МЫ
СМОЖЕМ
ВЕРНУТЬСЯ...
ДАВАЙ ТОГДА...

ЖИМ.



ого,
наконец-то!



КРУТЬ-КРУТЬ

волнуются,
суетятся

наконец-то компьютер заработал!



нормально
загружается?

ГР

УФ

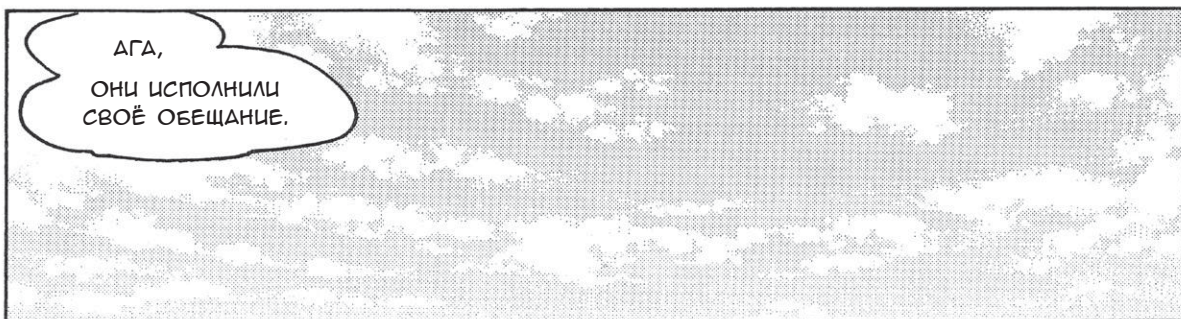
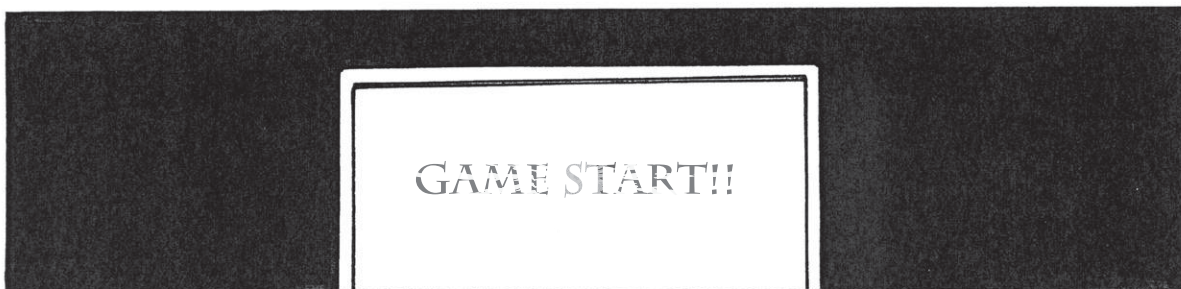
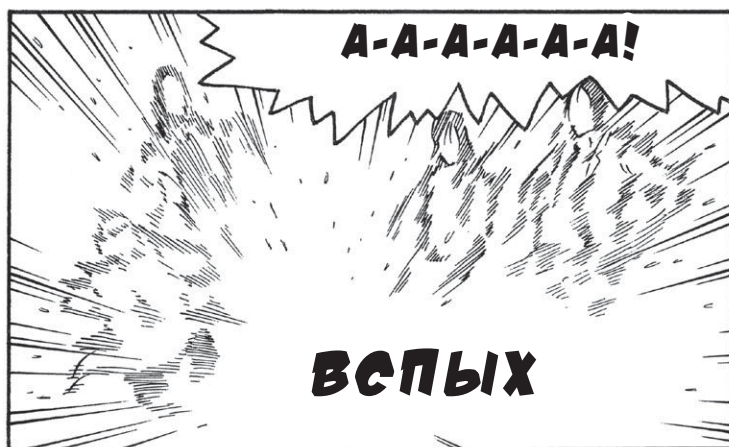
АХ



придётся немного
подождать. здесь у нас
только источник
питания этого фургона,
а он для компьютера
не подходит.

завтра мы пойдём
на электростанцию
и узнаем точно.







ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Y (звезда) — 165

Δ (треугольник) — 165

ε (эпсилон) — 148

А

Автоматическое пусковое устройство — 195

Активная мощность — 147

Атом — 19

Атомное ядро — 19

В

вар — 220

Векторное выражение мощности — 149

Вебер — 220

Ветровая электрогенерация — 213

Воздушная линия электропередачи — 218

Вращающееся магнитное поле — 194

Выпрямитель — 196

Д

Двигатели с пусковым конденсатором — 195

Действующие значения — 83, 149, 218

Джоулево тепло — 22

Диод — 196

Диск Араго — 194

Допустимый ток — 218

Е

Ёмкостная реактивность — 118, 119

Ёмкостное сопротивление — 117

З

Заземление — 218

Закон Ома — 41

Закон электромагнитной индукции
Фарадея — 114

И

Избыточный ток — 218

Инвертор — 196, 218

Индуктивная реактивность — 115

Индуктивность — 113, 114

Интернет по линиям электропередач — 215

Ионы — 217

Источник — 39, 217

К

Комплексные числа — 96, 100

Конвертор-выпрямитель — 196, 218

Конденсатор — 117

Короткое замыкание — 218

Космическая солнечная
электрогенерация — 211

Коэффициент мощности — 147, 148

Круговое магнитное поле — 113

Кулон — 117



Л

Линейные напряжения — 168

Линейный изолятор — 218

М

Магнитное действие электрического тока — 22

Магнитное поле — 113, 217

Мгновенные значения — 92

Мнимая единица — 97

Многопроволочный провод — 218

Многофазный переменный ток — 165

Молниезащитный разрядник — 218

Мощность в цепи переменного тока — 135, 145, 151

Мощность трёхфазного переменного тока — 181, 187

Н

Напряжение — 217

Нейтроны — 19

О

Общее сопротивление — 43

Однопроволочный провод — 165

Определение действующего значения — 94

П

Падение напряжения — 217

Переменный ток — 80, 217, 221

Период — 218

Пилообразный переменный ток — 80

Плавкий предохранитель — 218

Полная мощность — 147

Полное сопротивление — 113

Полное сопротивление цепи переменного тока — 157

Полярные координаты — 100

Последовательная цепь — 28, 39

Последовательное соединение — 217

Постоянный ток — 221

Потенциал — 217

Правило падений напряжения — 60, 218

Правило правого винта — 113, 194

Правило сохранения тока — 60, 168

Прерыватель — 218

Приёмник (нагрузка) — 39, 217

Принцип работы асинхронного двигателя — 194

Пробой на землю (короткое замыкание на землю) — 218

Провода — 167

Проводимость — 101, 120

Проводник — 217

Прямолинейное магнитное поле — 113

Прямоугольный ток — 80

Р

Радиянная мера — 81

Разность фаз — 81, 96, 121

Распределение электроэнергии — 218

Расчёт действующего значения — 94



Реактивная проводимость — 120

Резонансная частота — 157

Резонансные цепи — 157

С

Самоиндукция — 114

Сверхпроводящие катушки — 210

Светодиодное освещение — 215

Свободные электроны — 19

Сименс — 120

Симметричный трёхфазный переменный ток — 165

Синусоида — 80

Синусоидальный переменный ток — 81

Системы электрогенерации — 211

Системы электропередачи — 209

Скалярные величины — 96

Смысл действующего значения — 93

Соединение Y (соединение фаз звездой) — 168

Соединение Y-Y (соединение «звезда-звезда») — 169

Соединение Y-Δ (соединение «звезда-треугольник») — 169

Соединение Δ (соединение фаз треугольником) — 168

Соединение фаз многоугольником — 165

Соленоидные сверхпроводящие катушки — 210

Солнечная электрогенерация — 213

Стационарные векторы — 97

Т

Теорема Миллмана — 207

Теорема наложения — 74, 158

Теорема о максимальной мощности — 218

Теорема Пифагора — 146

Тепловое действие электрического тока — 21

Тепловой насос — 215

Технология передачи энергии на сверхвысоких частотах (СВЧ) — 210

Технология сверхпроводимости — 210

Токи при соединении Δ-Δ — 180

Топливные элементы — 213

Тороидальная катушка — 210

Треугольный ток — 80

Трёхфазный переменный ток — 164, 165, 166, 168

Тригонометрические функции — 145

Тригонометрия — 100

У

Умные сети электроснабжения — 209

Устройства управления — 39

Устройства, потребляющие электроэнергию — 215

Ф

Фазные напряжения — 168

Фазные токи — 180

Фазовый угол импеданса — 148

Фазовый угол импеданса полного
сопротивления — 148

Фарада — 220

Формула Эйлера — 98, 100

Формулы двойного угла — 146

Формулы сложения и вычитания
аргументов — 146

Х

Химическое действие электрического
тока — 24

Ц

Цепь переменного тока — 113

Ч

Частота — 217

Э

ЭДС — 217

ЭДС самоиндукции — 114

Эквивалентные схемы — 56, 57, 58

Экранирующая обмотка
(короткозамкнутый виток) — 195

Электрическая ёмкость — 117

Электрическая мощность — 148

Электрическая проводимость — 73, 120

Электрическая проводка — 39

Электрическая цепь — 21, 39

Электрическая энергия
(Электроэнергия) — 73

Электрический генератор — 80

Электрический ток — 21

Электрическое поле — 217

Электрогенерация и
электропередача — 197, 202

Электрогенерация ядерного синтеза — 212

Электролиз воды — 25

Электромагнитная волна — 114

Электромагнитная индукция — 76, 217

Электромагнитное поле — 217

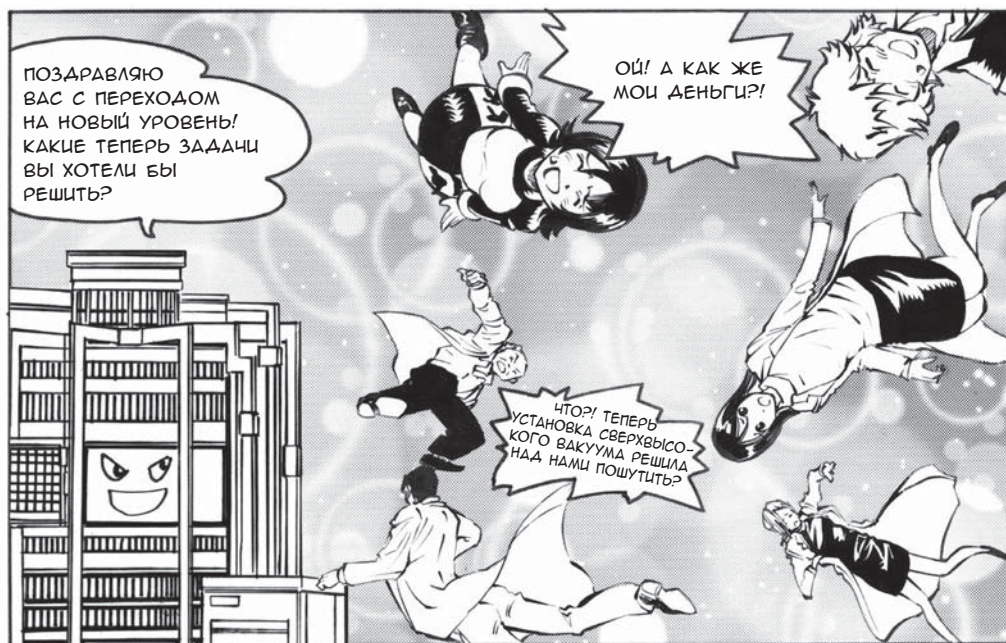
Электропередача — 218

Электростатическая индукция — 19

Электроэнергетическая система — 218

ОБ АВТОРЕ

Иида Ёсикадзу окончил Образовательный центр компании Tokyo Electric. В настоящее время работает в Ассоциации Обеспечения Электробезопасности района Канто, основная обязанность — разработка технологий. Имеет сертификат Старшего инженера-электротехника 1-ой категории. Основные произведения: «Электрические схемы — это просто!», «Доскональное изучение методики сдачи государственного экзамена по электротехнике. Законодательство», «Доскональное изучение методики сдачи государственного экзамена по электротехнике 2-ой ступени.» (Совместное авторство), «Государственный экзамен по электротехнике. Доскональное изучение вопросов по законодательству», «Самостоятельная подготовка к сдаче государственного экзамена по электротехнике».



Ёсикадзу Иида (автор), Ямада Гарэки (художник)

Электрические цепи. 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 А. Анненков

Корректор Г. И. Синяева

Формат 70×100/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. п. л. 15 Тираж 200 экз.

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