



## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

СТУДЕНТ ВАДА СОУТА ЗАШЕЛ В МАГАЗИН БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ ВСЕГО ЛИШЬ ЗА РИСОВАРКОЙ, НО УЗНАЛ ОТ ДОЧКИ ХОЗЯИНА КОПУ МНОГО ИНТЕРЕСНОГО – ВЕДЬ ОНА ЗНАЕТ ПРО ТЕХНИКУ ВСЁ! ТЕПЕРЬ УЖ ОН НЕ СПУТАЕТ ПОСТОЯННЫЙ И ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК И ТОЧНО ЗНАЕТ, В КАКОМ ПРИБОРЕ КАКОЙ ДВИГАТЕЛЬ РАБОТАЕТ. БЛАГОДАРЯ ЗНАНИЯМ КОПУ СТАРАЯ ТОРГОВАЯ УЛИЦА ГОРОДА ПРЕОБРАЗИЛАСЬ И ПОЛУЧИЛА НАЗВАНИЕ "ТОРГОВАЯ УЛИЦА С МОТОРАМИ". ВЕДЬ ДАЖЕ ОДИН ЧЕЛОВЕК МОЖЕТ СДЕЛАТЬ МИР ЛУЧШЕ – КАК РАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЕЛАЮТ ЖИЗНЬ ЛЮДЕЙ ПРОЩЕ И УДОБНЕЕ.

ЦЕЛЬ КНИГИ – ЗАИНТЕРЕСОВАТЬ ШКОЛЬНИКОВ, СТУДЕНТОВ И ПРОСТО ПЫТЛИВЫХ ЧИТАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКОЙ И СЛОЖНЫМИ ИНЖЕНЕРНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ.

Интернет-магазин: [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com)

Оптовая продажа: КТК "Галактика"  
books@aliens-kniga.ru

**DMK**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
[www.dmk.ru](http://www.dmk.ru)

ISBN 978-5-97060-726-8



9 785970 607268 >

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Моримото Масаюки  
Симадзу Рэн

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ



Моримото Масаюки  
Симадзу Рэн  
Trend-PRO Co., Ltd.



**DMK**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

**Ohmsha**

**Занимательная электротехника**

**Электрические двигатели**

**Манга**

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА

занимательная электротехника

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Масаюки Моримото  
Художник Рэн Симадзу

Перевод

С. Л. Плеханова

Научный редактор

А.Н. Рабодзей



**ДМК**  
ПРЕСС  
издательство

Москва  
ДМК Пресс, 2019



УДК 621.313

ББК 31.261

М 79

**Моримото М.**

М 79 Занимательная электротехника. Электрические двигатели / Масаюки Моримото (автор), Рэн Симадзу (худ.); пер. с яп. С. Л. Плехановой. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 200 с.: ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп.

ISBN 978-5-97060-726-8

В этой манге рассказывается об электрических двигателях, которых люди придумали великое множество. Студент Вада Соута зашел в магазин бытовой техники всего лишь за рисоваркой, но узнал от дочери хозяина магазина Коиру очень много интересного – ведь она знает про технику всё. Теперь уж он не спутает постоянный и переменный ток и точно знает, в каком приборе какой двигатель работает. Благодаря знаниям Коиру старая торговая улица города преобразилась и получила название «торговая улица с двигателями», ведь даже один человек может сделать мир лучше – как разные двигатели делают жизнь людей проще и удобнее.

Цель книги – заинтересовать школьников, студентов и просто пытливых читателей электротехникой и сложными инженерными механизмами.

УДК 621.313

ББК 31.261

Manga de Wakaru Mo:ta (Manga Guide: Electric Motors)

By Masayuki Morimoto (Author),

Illustration by Ren Shimazu (Illustrator),

and Office sawa, Ltd. (Producer).

Published by Ohmsha, Ltd.

Russian language edition copyright © 2018 by DMK Press.

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

ISBN 978-4-274-05010-7 (яп.)

Copyright © 2014 by Hiroshi Suemasu,  
Toshio Nagashima and Office sawa, Ltd.

ISBN 978-5-97060-726-8 (рус.) © Перевод, оформление, издание, ДМК Пресс, 2019



# ПРЕДИСЛОВИЕ

Вокруг нас постоянно находится большое количество электрических двигателей. Можно даже сказать, что мы окружены электродвигателями или моторами. Многие из предметов бытовой техники, используемые нами практически каждый день (например, кондиционер или пылесос), работают благодаря электрическим двигателям. Во внешнем мире мы тоже постоянно сталкиваемся с работающими от электродвигателей механизмами, такими как автомобили, лифты и т. д. Кроме того, даже необходимые для жизни вода и газ поставляются в наши дома с помощью насосов и компрессоров, работающих от электрических двигателей. Так что наша современная жизнь просто невозможна без электрических двигателей.

Говорят, что в последнее время около 70% всех производимых в мире электродвигателей выпускаются японскими производителями. Так что можно сказать, Япония – это империя электрических двигателей. А японские технологии в области производства электрических двигателей являются лидирующими в современном мире.

Растёт количество электрических двигателей в мире, и вместе с тем растёт и количество людей, желающих понимать принципы работы и применения электродвигателей. Однако мне часто приходилось слышать от людей, не являющихся техническими специалистами, что книги о электрических двигателях трудны для понимания. Почему это так? Работа электрических двигателей осуществляется благодаря электрическим и магнитным явлениям. Ни того, ни другого мы не можем увидеть глазами. А невидимые глазом явления, как ни объясняй их словами или формулами, всё-таки довольно трудно себе представить. Поэтому, чтобы сделать лёгкими для понимания принципы работы и устройство электрических двигателей, нужны не текст, не формулы, а картинки. Но не одни только картинки, а манга, где рисунки используются для наглядного объяснения. И как раз в этой книге с помощью манги мы расскажем о принципах работы электрических двигателей (небольшие двигатели часто называют моторами). Здесь мы подробно рассмотрим часто использующиеся в современном мире электродвигатели постоянного тока, бесщёточные электродвигатели, а также синхронные и асинхронные электрические двигатели.

Дисциплина, изучающая электрические двигатели, называется «Электрооборудование». Учебники по электрооборудованию довольно сложны даже для студентов-электриков. Эту же книгу мы делали с таким намерением, чтобы она разъясняла основы электрических двигателей языком, понятным широкому кругу людей.

Выпуск манги – это самый настоящий производственный процесс. Этот процесс состоит из переработки текста в сценарий, создания иллюстраций, редактирования и, наконец, печати. И если бы не тщательная работа людей, отвечающих за каждый из этапов, у нас бы не получилось такой замечательной манги. Эта книга – результат командной работы большого количества людей. Мы надеемся, что после ее прочтения вы полюбите электрические двигатели. И для этого совсем не обязательно становиться моторным фанатиком.

# СОДЕРЖАНИЕ

Пролог.

ГОТОВЬТЕСЬ СЛУШАТЬ, КАКИЕ ДВИГАТЕЛИ КРУТЫЕ! . . . 1

## 1. ВСЯКИЕ РАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ . . . 9

1.1. ГДЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ? . . . . . 10

1.2. ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ . . . . . 20

1.3. ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ . . . . . 24

ДОПОЛНЕНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА . . . . . 33

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ . . . . . 34

## 2. ЧТО ЖЕ ИЗ СЕБЯ ПРЕДСТАВЛЯЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ? . . . . . 37

2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ – ЭТО.... . . . . . 38

2.2. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ . . . . . 43

2.3. ПРИНЦИП ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ . . . . . 45

2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ . . . 53

2.5. МОМЕНТ СИЛЫ. . . . . 56

ДОПОЛНЕНИЕ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ . . . . . 60

ПОЧЕМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ВРАЩАЮТСЯ . . . . . 62

ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛЫ . . . . . 66

## 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА . . . . . 69

3.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА . . . . . 70

3.2. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОМОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА . . . . . 75

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| <b>3.3. УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ</b> |    |
| ПОСТОЯННОГО ТОКА . . . . .                        | 79 |

#### **ДОПОЛНЕНИЕ**

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПОЧЕМУ ВРАЩАЮТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА? . . .                                                       | 84 |
| КОНСТАНТА МОМЕНТА СИЛЫ И КОНСТАНТА ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ. . .                                                        | 86 |
| ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЦЕПИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОТОРА ПОСТОЯННОГО<br>ТОКА И СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ТАКИМИ ЭЛЕКТРОМОТОРАМИ . . . . . | 87 |

### **4. БЕСЩЁТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ . . . 89**

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 4.1. ЩЁТКИ – ЭТО... . . . . . | 90 |
|-------------------------------|----|

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 4.2. ПРИНЦИП РАБОТЫ БЕСЩЁТОЧНОГО ЭЛЕКТРОМОТОРА. . . . . | 97 |
|---------------------------------------------------------|----|

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 4.3. УСТРОЙСТВО БЕСЩЁТОЧНОГО ЭЛЕКТРОМОТОРА. . . . . | 103 |
|-----------------------------------------------------|-----|

#### **ДОПОЛНЕНИЕ**

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| ФУНКЦИЯ ЩЁТОК . . . . .                                  | 107 |
| ЗА СЧЁТ ЧЕГО РАБОТАЮТ БЕСЩЁТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ. . . . . | 108 |
| ЗАМЕНА ЩЁТОК ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ . . . . .                    | 109 |
| ДАТЧИК В БЕСЩЁТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМОТОРАХ . . . . .            | 110 |
| НАЗВАНИЕ «БЕСЩЁТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ» . . . . .           | 114 |

### **5. СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ . . . . . 115**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5.1. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. . . . . | 116 |
|------------------------------|-----|

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 5.2. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. . . . . | 123 |
|------------------------------------------|-----|

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. . . . . | 127 |
|-----------------------------------------------------------|-----|

#### **ДОПОЛНЕНИЕ**

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| ЧТО ТАКОЕ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. . . . .                       | 137 |
| ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК И ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. . . . .    | 139 |
| ПОЧЕМУ ВРАЩАЕТСЯ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ? . . . . . | 143 |
| УСТРОЙСТВО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. . . . .        | 145 |
| ИНДУКТИВНОСТЬ . . . . .                                 | 147 |



## **6. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ . . . . . 149**

6.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ . . . . . 150

6.2. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. . . . . 158

6.3. ОСОБЕННОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ . . . . . 162

### **ДОПОЛНЕНИЕ**

ПРИНЦИП РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. . . . . 171

УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ . . . . . 173

СВОЙСТВА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ . . . . . 173

ИМПЕДАНС. . . . . 175

## **Приложение**

## **ДРУГИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ. . . . . 183**

ШАГОВЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР. . . . . 184

ВЕНТИЛЬНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР. . . . . 186

ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР . . . . . 188

. . . . .

## **ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ. . . . . 189**

Пролог

ГОТОВЬТЕСЬ  
СЛУШАТЬ, КАКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ КРУТЫЕ!



НУ ХОТЬ И ГОДОМ ПОЗЖЕ,  
НО В УНИВЕРСИТЕТ Я ПОСТУПИЛ...

Торговая улица  
«Электрическая»

И В СТОЛИЦУ ПЕРЕБРАЛСЯ,  
ЧТО ПРЕКРАСНО, ВОТ ТОЛЬКО...

...НИЧЕГО У МЕНЯ  
ПОКА НЕТ,

НИ ХОЛОДИЛЬНИКА,  
НИ РИСОВАРКИ...

ХМ...

Электроника  
Сэндо  
и бытовая техника

АГА, ВОТ И МАГАЗИН  
БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ!

Вада Соута





ПРАВДА,  
МАГАЗИНЧИК,  
КАЖЕТСЯ, СОВСЕМ  
СТАРЫЙ...

ЗАТО В ТАКИХ  
МАГАЗИНАХ ОБЫЧНО  
СЛУЖАЩИЕ ДОБРЕЕ...



КАК БЫ ТО НИ БЫЛО,  
ПОПРОБУЮ ЗАЙТИ.  
ДОБРЫЙ ДЕНЬ!



**СКРИП**

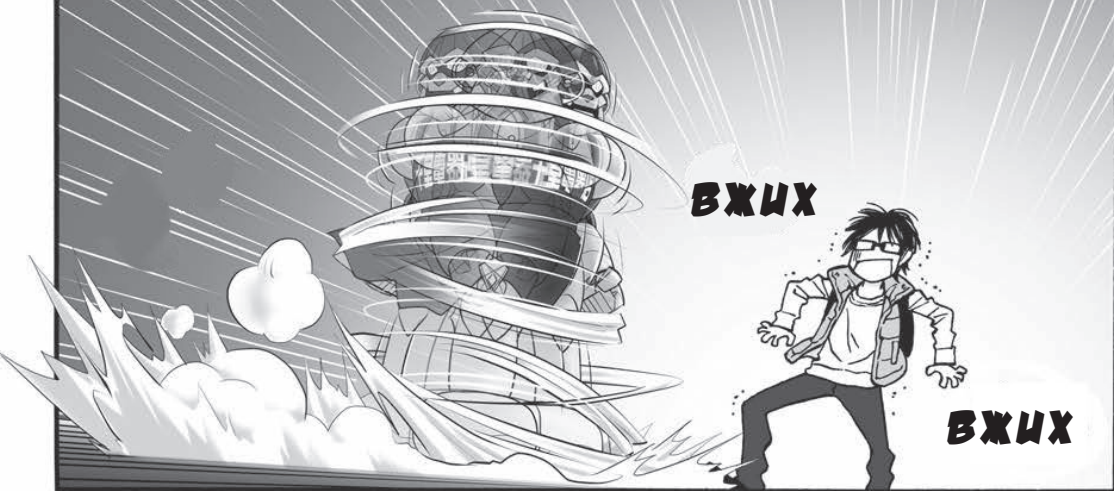
!?



ДО-БРО  
ПО-ЖА-ЛО-  
ВАТЬ!!!

ОООЙ!!





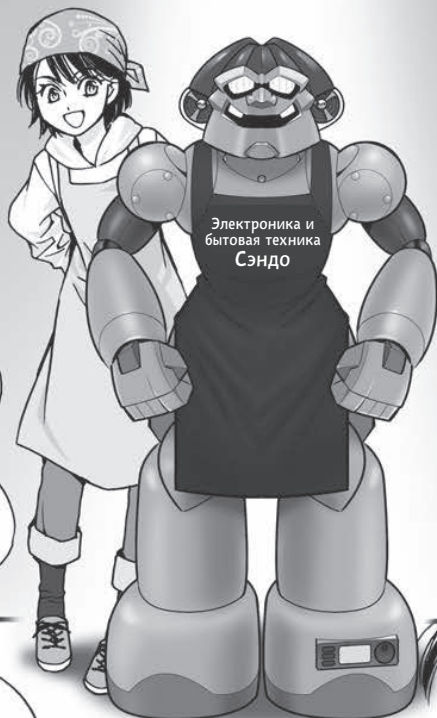


СИ-  
СИМПАТИЧ-  
НЫЙ....

КАК ВАМ  
НАШ "АССИСТЕНТ  
НОМЕР 6"?

ОН, ПРАВДА,  
ПОКА ЕЩЁ НА  
ТЕСТИРОВАНИИ...

УХ ТЫ... ВСЁ-ТАКИ  
В ТОКИО ЗАОРОВО...



ОН УЖЕ  
БЕСПРОВОДНОЙ,  
А ГОЛОСОМ МОЖНО  
УПРАВЛЯТЬ  
С ПОМОЩЬЮ ПУЛЬТА.



БОЛЬ-ШО-Е  
СПА-СИ-БО!



А...  
ВЫ НЕ МОГЛИ БЫ  
ВМЕСТО МЕНЯ  
ВЫБРАТЬ БЫТОВУЮ  
ТЕХНИКУ?!

СЕЙЧАС ТАК МНОГО  
ВСЯКИХ ПРИБОРОВ  
И МЕХАНИЗМОВ...

ЧТО Я НИКАК  
НЕ МОГУ ПОНЯТЬ,  
ЧТО ЖЕ ЛУЧШЕ  
ВЫБРАТЬ...



ЧТО?







АА, ЕСЛИ  
ПРИСМОТРЕТЬСЯ,  
ВОКРУГ НАС СПЛОШНЫЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ, ИЛИ, ПРОЩЕ  
ГОВОРЯ, МЕХАНИЗМЫ!

Устройство «ассис-  
тента номер 6»

Электрический  
двигатель

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМ  
УЖЕ БОЛЕЕ СТА ЛЕТ,  
И ОНИ ИСПОЛЗУЮТСЯ  
ПОВСЕМЕСТНО!

СКРЫТЫЕ ОТ ГЛАЗ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ, ОНИ,  
НЕ ПЕРЕСТАВАЯ,  
РАЗВИВАЮТСЯ.

В... В ДВИГАТЕЛЯХ  
ВЫ ПРЯМ ДОКА,  
ДА?

ПОТОМУ ЧТО  
Я - СЭНДО КОИРУ -  
"ФАНАТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ!"

**БУХ!**



С РАННЕГО ДЕТСТВА  
В ЭТОМ МАГАЗИНЕ  
Я ВИДЕЛА ДВИГАТЕЛИ,  
ТРОГАЛА ИХ...

...СЛУШАЛА ЗВУК  
РАБОТАЮЩИХ  
МОТОРОВ...

...И УЖ ПО ПОВОДУ  
БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ  
Я ВАМ ВСЁ КАК СЛЕДУЕТ  
ОБЪЯСНЮ.

ТАК ЧТО ГОТОВЬТЕСЬ  
СЛУШАТЬ, КАКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ КРУТЫЕ!

СТУК  
СЕРАЦА

# Глава 1

## ВСЯКИЕ РАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

## 1.1. ГДЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ?

БОЛЬШИНСТВО  
СОСТАВЛЯЮЩИХ НАШЕЙ  
СОВРЕМЕННОЙ ЖИЗНИ  
СУЩЕСТВУЮТ БЛАГОДАРЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
ДВИГАТЕЛЯМ!

ДВИГАТЕЛЯМ?!

ПОСМОТРИТЕ  
СЮДА!

НА ЭТОЙ ДИАГРАММЕ  
ПОКАЗАНЫ ОСНОВНЫЕ  
СФЕРЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЯПОНИИ!

НО ВЕДЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ -  
ЭТО ТАКОЙ МЕХАНИЗМ,  
КОТОРЫЙ ВРАЩАЕТСЯ,  
ЕСЛИ К НЕМУ ПОСТУПАЕТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, ДА?

КАК ЖЕ ТАКОЕ  
ПРОСТОЕ УСТРОЙСТВО  
МОЖЕТ ИМЕТЬ ТАКОЕ  
БОЛЬШОЕ ЗНАЧЕНИЕ?..





НА САМОМ ДЕЛЕ  
ИЗ ПРИМЕРНО ОДНОГО  
ТРИЛЛИОНА КИЛОВАТТ  
ПРОИЗВОДИМОЙ ЗА ГОД  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ...

...БОЛЬШЕ ПОЛОВИНЫ  
ПОТРЕБЛЯЕТСЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ  
ДВИГАТЕЛЯМИ!

БОЛЬШЕ  
ПОЛОВИНЫ!?

ГОВОРЯТ ДАЖЕ, ЧТО ЕСЛИ ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ УВЕЛИЧИТЬ  
ВСЕГО НА 1%,...

...ТО ЭТО СДЕЛАЕТ  
НЕНУЖНОЙ РАБОТУ  
ЦЕЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.

ОГО... ЗНАЧИТ...

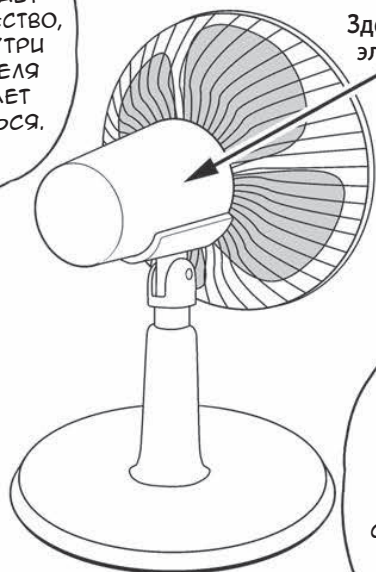
ГОРОДА ВРОДЕ ТОКИО  
ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ИСПОЛЗУЮТ  
ТАК МНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ?!

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ  
ОДИНАКОВО ШИРОКО  
ИСПОЛЗУЮТ И В ГОРОДАХ,  
И В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ.

НАПРИМЕР...

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ,  
ЧТО ВОТ В ЭТОМ МЕСТЕ  
У ФЕНА НАХОДИТСЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
МОТОР?

КОГДА  
ПОСТУПАЕТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО,  
ВАЛ ВНУТРИ  
ДВИГАТЕЛЯ  
НАЧИНАЕТ  
ВРАЩАТЬСЯ.



Здесь находится  
электрический  
мотор

ВСЛЕД  
ЗА ВАЛОМ  
ДВИГАТЕЛЯ  
НАЧИНАЮТ  
ВРАЩАТЬСЯ И  
СОЕДИНЁННЫЕ  
С НИМ ЛОПАСТИ  
ВЕНТИЛЯТОРА.

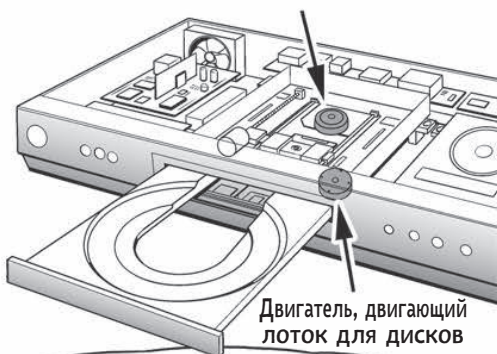
И ВСЕ СТИРАЛЬНЫЕ МАШИНЫ  
ИСПОЛЬЗУЮТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ,  
ЧТОБЫ ПЕРЕМЕШИВАТЬ ВОДУ  
ДЛЯ СТИРКИ И СУШИТЬ БЕЛЬЁ.



Лопасты,  
которые  
вращают  
воду

Электри-  
ческий  
двигатель

Двигатель для вращения дисков



Двигатель,двигающий  
лоток для дисков

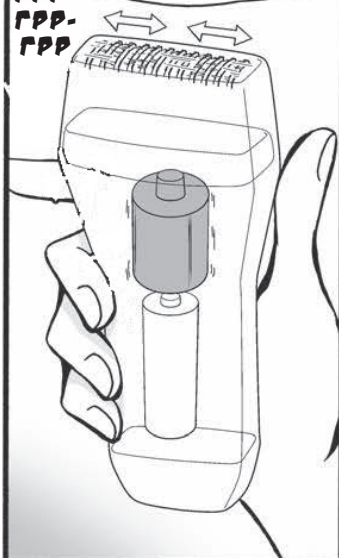
А В ПРОИГРЫВАТЕЛЕ  
ДЛЯ VLSI-RAY-ДИСКОВ  
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
ДАЖЕ НЕСКОЛЬКО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

ОДИН ДВИГАТЕЛЬ ОТВЕЧАЕТ  
ЗА РАБОТУ ЛОТКА ДЛЯ ДИСКОВ,  
А ДРУГОЙ - ЗА ВРАЩЕНИЕ  
ДИСКА ВНУТРИ ПРОИГРЫВАТЕЛЯ.

И ДВИЖЕНИЕ  
ЛЕЗВИЙ  
В БРИТВЕ...

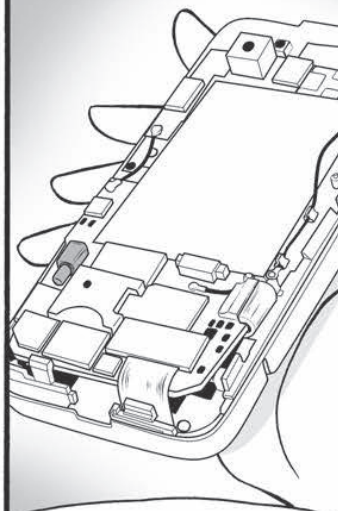
...ТОЖЕ  
ПРОИСХОДИТ  
БЛАГОДАРЯ  
ВСТРОЕННОМУ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ  
МОТОРУ.

ГРР-  
ГРР-  
ГРР



И ГОРЯЧИЙ ВОЗДУХ,  
ДУЮЩИЙ ИЗ ФЕНА,  
ТОЖЕ ПОЛУЧАЕТСЯ  
ПОТОМУ, ЧТО  
НАХОДЯЩИЙСЯ ВНУТРИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР  
ВРАЩАЕТ ВЕНТИЛЯТОР.

А ТАКЖЕ  
ФУНКЦИЯ ВИБРАЦИИ  
В МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНАХ  
И СМАРТФОНАХ...



...ВОЗМОЖНА  
БЛАГОДАРЯ КРОШЕЧНОМУ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЧИКУ  
ВНУТРИ, КОТОРЫЙ  
ВЫЗЫВАЕТ КОЛЕБАНИЯ  
МАЛЕНЬКОГО ГРУЗИКА.

А ТАК КАК УЖЕ У ВСЕХ ЕСТЬ  
МОБИЛЬНЫЕ ТЕЛЕФОНЫ ИЛИ  
СМАРТФОНЫ, ТО КАЖДЫЙ  
ИЗ НАС ВСЕГДА ИМЕЕТ  
ПРИ СЕБЕ КАК МИНИМУМ ОДИН  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР!

АА-ААЖЕ ЗАЕСЬ  
ЕСТЬ ДВИГАТЕЛЬ.

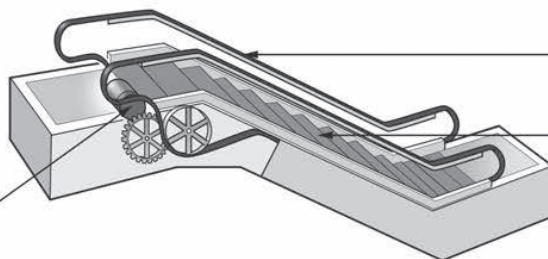


И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ  
ПРИНОСЯТ НАМ ПОЛЬЗУ  
ВО МНОГИХ ОБЛАСТЯХ,  
НЕ ТОЛЬКО В БЫТУ!





ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭСКАЛАТОРА ТАКЖЕ ПРЯЧЕТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ.



Движущийся поручень

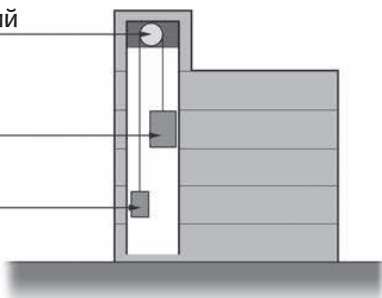
Ступеньки

Электрический двигатель

Электрический двигатель

Кабина

Противовес

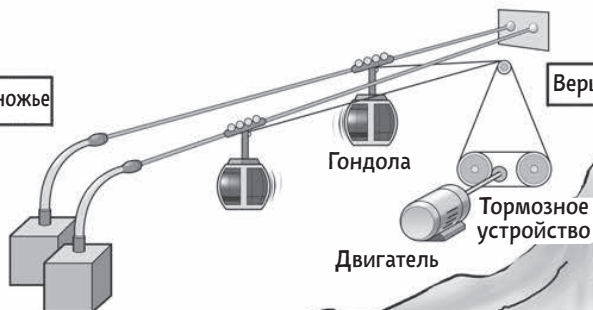


И ЗА ПОДЪЕМ И СПУСК ЛИФТА ОТВЕЧАЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ.

А ЕСЛИ ГОВОРИТЬ ОБ УСТРОЙСТВЕ КАНАТНОЙ ДОРОГИ, ТО ЭТО РАСПОЛОЖЕННЫЙ НА ВЕРХНЕЙ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ ЗАСТАВЛЯЕТ ДВИГАТЬСЯ КАНАТ.

Подножье

Грузы, натягивающие канаты



Вершина

Гондола

Двигатель

Тормозное устройство

ТАКЖЕ И НАСОС, СНАБЖАЮЩИЙ ВОДОЙ МНОГОЭТАЖНОЕ ЗАДАНИЕ, РАБОТАЕТ БЛАГОДАРЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ДВИГАТЕЛЮ!



Водо-приёмник

Водо-провод

Насос, приводящийся в движение электрическим двигателем



Водо-проводный кран

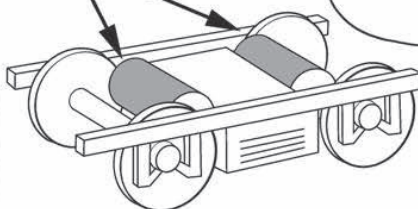
ЗНАЧИТ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ДАЖЕ ВОДУ ДВИГАЮТ!..



КРОМЕ ТОГО, МНОЖЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ В ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ! ТАК, ПОД ПОЛОМ ЭЛЕКТРИЧКИ НАХОДИТСЯ СПЕЦИАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА, К КОТОРОЙ ПРИСОЕДИНЕНЫ КОЛЁСА.



Электрический двигатель

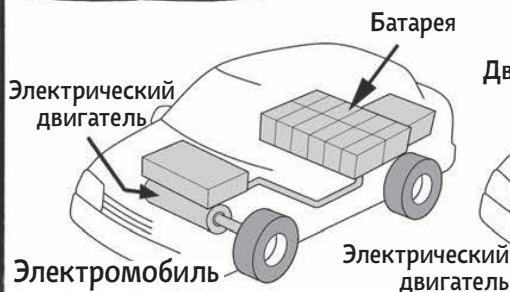


А ВНУТРИ ЭТОЙ ПЛАТФОРМЫ НАХОДЯТСЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ, КОТОРЫЕ, ВРАЩАЯСЬ САМИ, ЗАСТАВЛЯЮТ ВРАЩАТЬСЯ И КОЛЁСА.

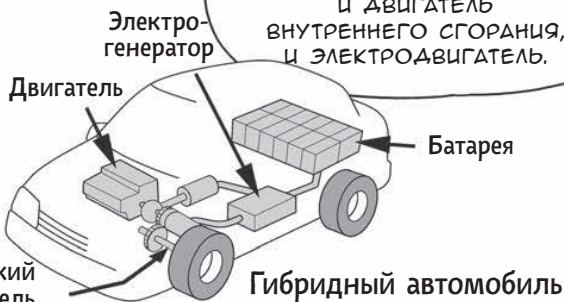
ТАК ВОТ В ЧЁМ ПРИЧИНА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕК.



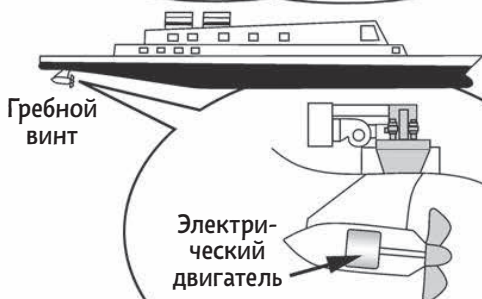
ЭЛЕКТРОМОБИЛИ РАБОТАЮТ ПОЛНОСТЬЮ НА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ.



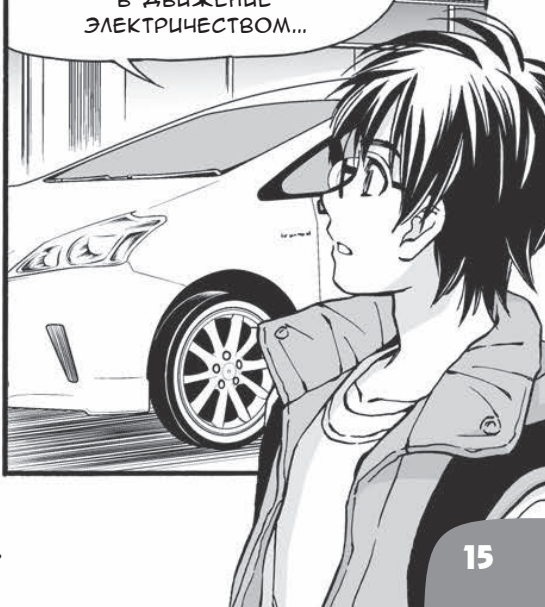
А ГИБРИДНЫЕ АВТОМОБИЛИ ИСПОЛЬЗУЮТ И ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ.



И НА КОРАБЛЯХ НАХОДЯЩИЙСЯ ПОД АНОМ КОРАБЛЯ ГРЕБНОЙ ВИНТ СНАБЖЁН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДВИГАТЕЛЕМ, КОТОРЫЙ ВРАЩАЕТ ЛОПАСТИ И ТЕМ САМЫМ ДВИГАЕТ КОРАБЛЬ ВПЕРЁД И ПОЗВОЛЯЕТ МЕНЯТЬ КУРС.



ВОТ ОНО ЧТО... СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМОБИЛИ ПРИВОДЯТСЯ В ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ...



КСТАТИ, И В ОБЫЧНЫХ  
АВТОМОБИЛЯХ  
С ДВИГАТЕЛЯМИ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ  
ТОЖЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
МНОЖЕСТВО  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ!

ЭЭ...  
ЭТО  
ГДЕ ЖЕ?

МИНИМУМ 50 ШТУК...

А В АВТОМОБИЛЯХ ВЫСОКОГО  
КЛАССА ОКОЛО 150!

Электродвигатель системы вентиляции  
Электродвигатель системы открывания  
багажника  
Электродвигатель антенны  
Электродвигатель для автоматической  
шторы от солнца

Электродвигатель для дворников (спереди и сзади)  
Насос омывателя стекла (спереди и сзади)

Электро-  
двигатель  
люка

Электродвигатель системы  
регулировки зеркал

Электро-  
двигатель  
топливного  
насоса

Электродвигатель для радиатора охлаждения  
Электродвигатель для кондиционера  
Электродвигатель клапана холостого хода  
Электродвигатель вентилятора охлаждения  
Электродвигатель водяной помпы  
Электродвигатель вакуумного насоса

Электродвигатель  
для кондиционирования салона  
Электродвигатель  
для регулировки сидений  
Электродвигатель для автоматичес-  
кого стеклоподъемника  
Электродвигатель  
для электрозамка дверей  
Электродвигатель  
для регулировки спинки сидений  
Электродвигатель для усилителя руля  
Электродвигатель для круиз-контроля

ВОТ ТАКИМ МНОЖЕСТВОМ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ОБОРУДОВАН ОБЫЧНЫЙ  
АВТОМОБИЛЬ.

НИЧЕГО  
СЕБЕ!?

ПОТОМУ ЧТО  
В МАШИНЕ ВЕДЬ  
НЕ ТОЛЬКО  
КОЛЁСА  
ВРАЩАЮТСЯ!

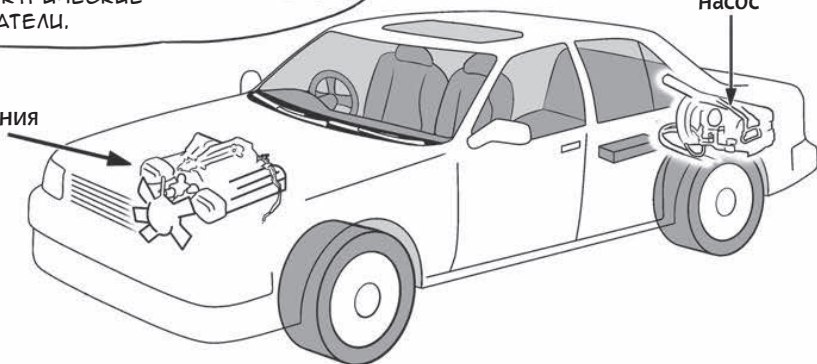


ТАК, НАПРИМЕР, НАХОДЯЩИЕСЯ  
В МАШИНЕ ВЕНТИЛЯТОР  
И ТОПЛИВНЫЙ НАСОС  
СОВЕРШАЮТ ОБОРОТЫ ПОТОМУ,  
ЧТО ВРАЩАЮТСЯ СОЕДИНЕННЫЕ  
С НИМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ.



Топливный  
насос

Двигатель  
внутреннего сгорания



НО ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ, ИМЕЮЩИЕСЯ  
В АВТОМОБИЛЕ,  
СОВЕРШАЮТ НЕ ТОЛЬКО  
ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ  
ДВИЖЕНИЯ.

НАПРИМЕР, ВОТ ЭТОТ  
ЭЛЕКТРОСТЕКЛОПОДЪЕМНИК.



ДВИГАТЕЛЬ,  
ПРИСОЕДИНЁННЫЙ  
К ОКОННОМУ СТЕКЛУ,  
ДВИГАЕТ ТРОСЫ,  
И БЛАГОДАРЯ ЭТОМУ  
С ПОМОЩЬЮ РЕЙКИ  
ПОДНИМАЕТСЯ ИЛИ  
ОПУСКАЕТСЯ СТЕКЛО.

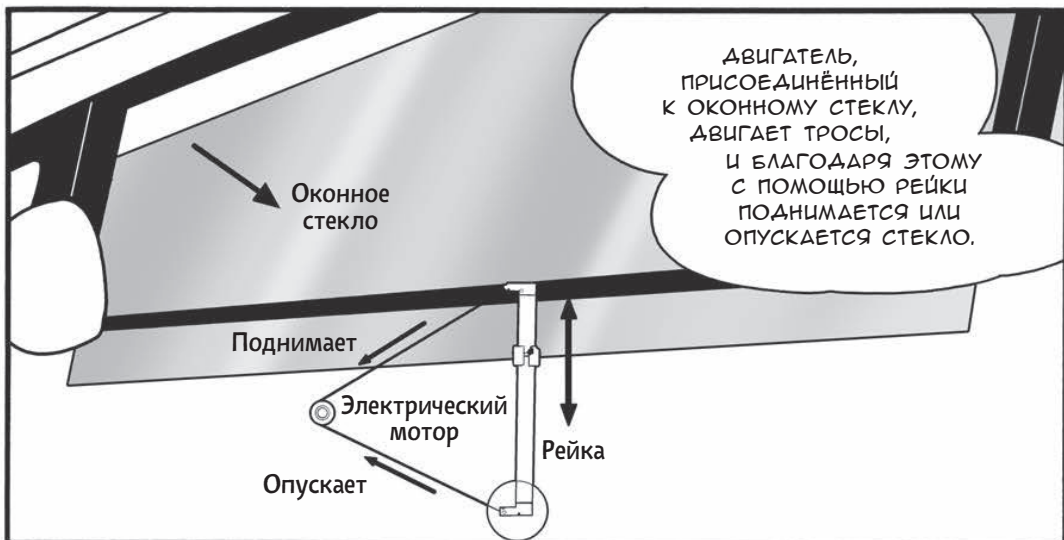
Оконное  
стекло

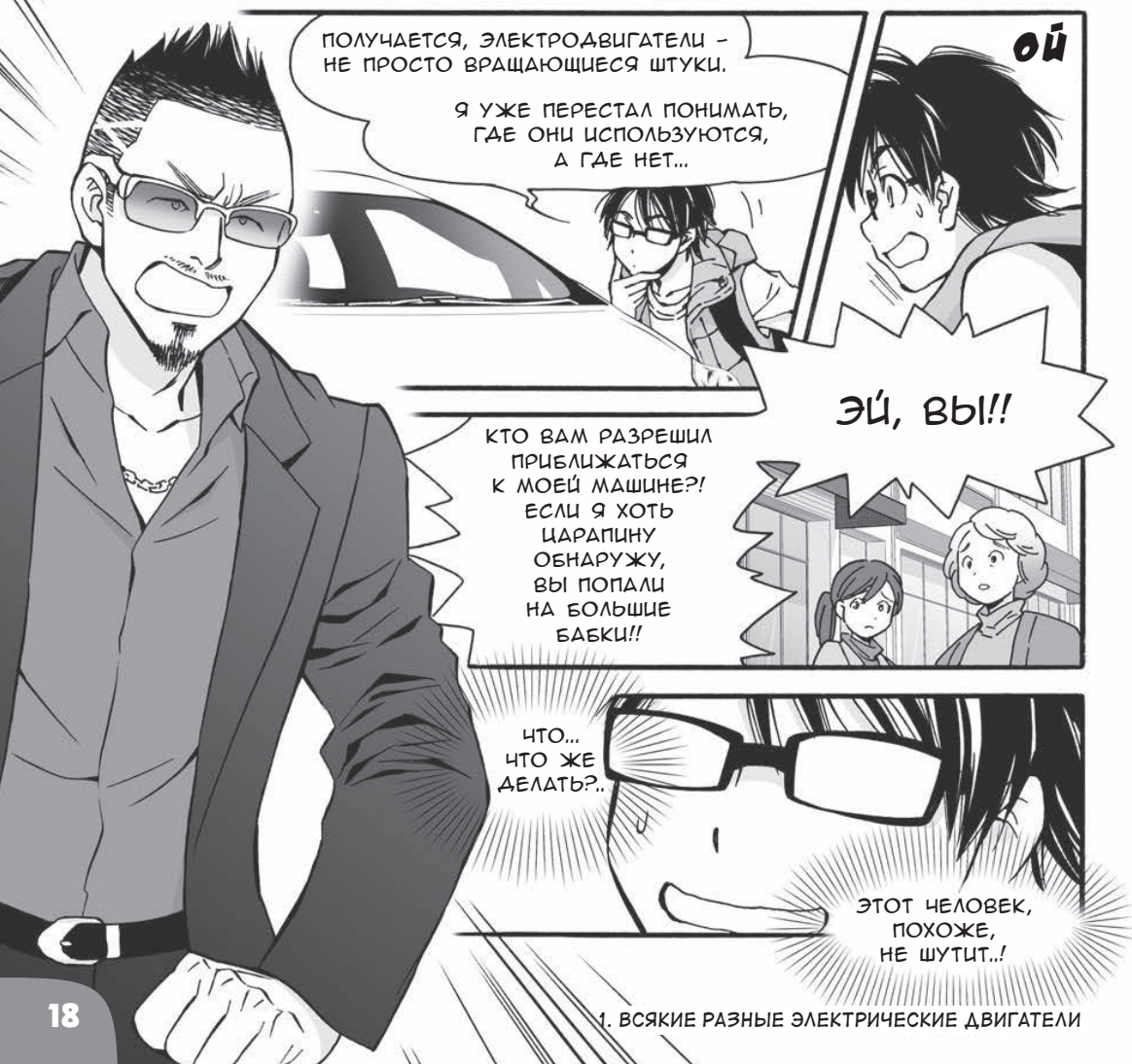
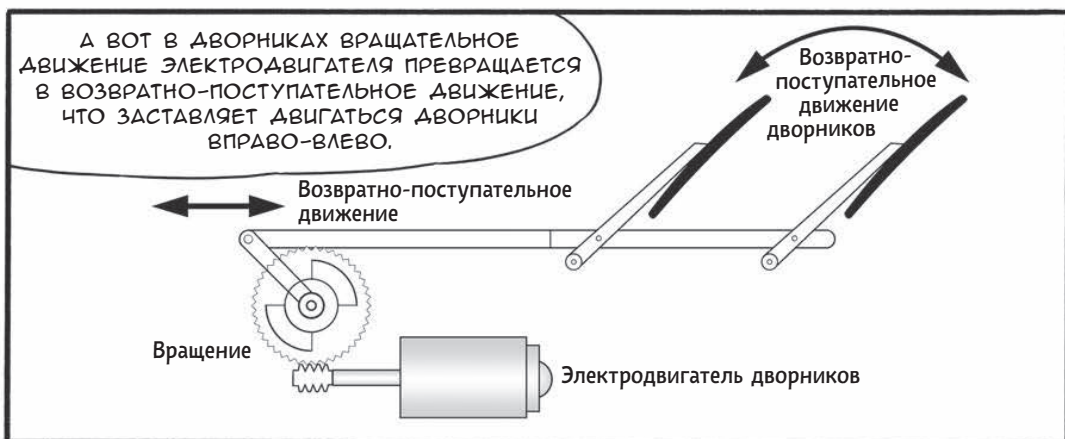
Поднимает

Электрический  
мотор

Опускает

Рейка











## 1.2. ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

И БОЛЬШЕ ЗДЕСЬ  
НЕ ПОЯВЛЯЙСЯ!

**ВЖИХ!**

ТЫ, КАК ВСЕГДА,  
МОЛОДЕЦ, КОПРУ.

НЕТ, НУ ЧТО ВЫ...

С НЕДАВНИХ ПОР  
ПОДОБНЫЕ ТИПЫ  
К НАМ ЗАЧАСТИЛИ...  
НО С ТОБОЙ, КОПРУ,  
НАМ БОЯТЬСЯ  
НЕЧЕГО!

Китайская  
медицина

ММ...  
А ЭТО КТО?

ЭТО НАШ ПОСЕТИТЕЛЬ.  
Я ЕМУ РАССКАЗЫВАЛА ПРО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ,  
А ТУТ ТАКАЯ ИСТОРИЯ...

ПОНЯТНО...



Я ТЕБЕ ПРОЯСНЮ КОЕ-ЧТО.  
ОНА ТАК ЛЮБЕЗНО ТЕБЕ ВСЁ  
ОБЪЯСНЯЕТ, ПОТОМУ ЧТО ОНА  
БЕЗ УМА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ...



...А НЕ ПОТОМУ, ЧТО ОНА  
ЗАИНТЕРЕСОВАЛАСЬ ТОБОЙ. Я ЭТО  
ЗАТЕМ ГОВОРЮ, ЧТОБЫ ТЫ НЕНАРОКОМ  
НЕ ПОНЯЛ ЕЁ НЕПРАВИЛЬНО.



ЧТО... К ЧЕМУ  
ЭТИ СЛОВА?..



К ТОМУ, ЧТО УЧИСЬ  
БЫСТРЕЕ И УХОДИ.



ИТАК, СУЩЕСТВУЮТ  
РАЗНЫЕ ВИДЫ ДВИГАТЕЛЕЙ.  
ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ЗАВИСИТ  
ОТ ТРЕБУЕМОЙ МОЩНОСТИ  
И КОЭФФИЦИЕНТА  
ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.



ЧТО?!



НЕ-ЕТ!!!



ПРО ДВИГАТЕЛИ  
РАССКАЗЫВАЮ Я!!

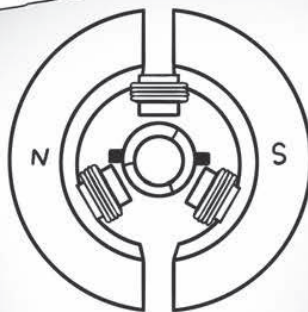


ДЛЯ НАЧАЛА  
ДОСТАТОЧНО  
ЗАПОМНИТЬ  
ЧЕТЫРЕ ВИДА  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ!



ПЕРВЫЙ - ЭТО  
"ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА".  
ОН ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
В МЕХАНИЗМАХ МАЛЫХ  
РАЗМЕРОВ.

НАПРИМЕР, ПОЧТИ ВСЕ  
ИГРУШЕЧНЫЕ МОДЕЛИ  
НА БАТАРЕЙКАХ  
ИСПОЛЬЗУЮТ ЭТОТ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ.

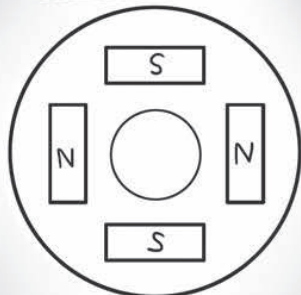


СЛЕДУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ТОЖЕ МАЛОГО  
ФОРМАТА, ЭТО ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ  
В БЫТОВОЙ ТЕХНИКЕ И В КОМПЬЮТЕРАХ  
"БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ".

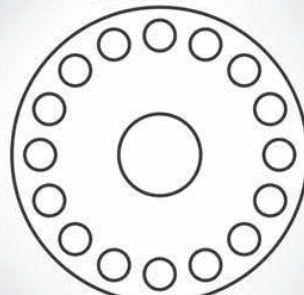




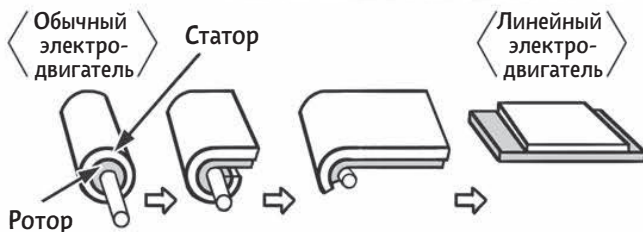
ДАЛЕЕ ИДЁТ "СИНХРОННЫЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ",  
В ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ ШИРОКО  
ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ, НАПРИМЕР  
В КОНДИЦИОНЕРАХ, ГИБРИДНЫХ  
АВТОМОБИЛЯХ И Т. Д.



И НАКОНЕЦ, "АСИНХРОННЫЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ",  
ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ  
В РАЗНОГО РОДА ВЕНТИЛЯТОРАХ.



КРОМЕ ЭТОГО, КОНЕЧНО,  
СУЩЕСТВУЮТ ЕЩЁ РАЗНЫЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ,  
НАПРИМЕР ВЕНТИЛЬНЫЙ  
РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ИЛИ  
ЛИНЕЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, НО...



РАЗОБРАВШИСЬ  
ДЛЯ НАЧАЛА  
С ЭТИМИ  
ЧЕТЫРЬМЯ,  
ТЫ УЖЕ  
СМОЖЕШЬ ПОНЯТЬ,  
КАК ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ!



| Классификация электродвигателей   | Где часто используется                         | Часто используемый размер   |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|
| Электродвигатель постоянного тока | Автомобили, аудиосистемы, игрушечные модели    | Миниатюрные                 |
| Бесколлекторный электродвигатель  | Бытовая техника, компьютеры                    | Маленькие                   |
| Синхронный электродвигатель       | Кондиционеры, роботы, электрические автомобили | Маленькие, средние          |
| Асинхронный электродвигатель      | Насосы, электрички, лифты, вентиляторы         | Маленькие, средние, большие |

### 1.3. ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

НАДО ЖЕ...  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ И ВПРЯМЬ,  
ОКАЗЫВАЕТСЯ,  
УДИВИТЕЛЬНЫЕ.



АГА, ПОЯВИЛСЯ  
ИНТЕРЕС, ДА?!

Я, ВООБЩЕ-ТО,  
ГУМАНИТАРИЙ...

...И В УНИВЕРСИТЕТ  
ПОСТУПИЛ НЕ  
С ПЕРВОГО РАЗА.



АНИМЕ ХОТЬ И ЛЮБЛЮ,  
НО С МЕХАНИЗМАМИ  
ВСЯКИМИ Я НЕ ОЧЕНЬ...

ТАК ЧТО ПРО  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ  
Я НИКОГДА РАНЬШЕ  
И НЕ ЗАДУМЫВАЛСЯ...



СТОИТ ТОЛЬКО НАЧАТЬ,  
И УЖЕ НЕ СМОЖЕШЬ  
ОСТАНОВИТЬСЯ!  
В ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ  
ВСЁ БОЛЬШЕ  
ПОЯВЛЯЕТСЯ НОВЫХ  
НЕВЕРОЯТНЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.





И ПРОИСХОДИТ ЭТО  
БЛАГОДАРЯ ТРЁМ  
ВАЖНЫМ СОБЫТИЯМ,  
ПРОИЗОШЕДШИМ  
В КОНЦЕ XX ВЕКА.

**ПАПАМ**

ТРЁМ ВАЖНЫМ  
СОБЫТИЯМ?!



ПЕРВОЕ - ЭТО ИЗОБРЕТЕНИЕ  
В 1984 ГОДУ  
НЕОДИМОВОГО МАГНИТА !



ЭТО ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ  
И ОЧЕНЬ МОЩНЫЙ.

БЛАГОДАРЯ ЕМУ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ  
СТАЛО ВОЗМОЖНО  
УМЕНЬШАТЬ В РАЗМЕРАХ,  
А ТАКЖЕ МЕНЯТЬ  
ИХ ФОРМУ,  
НАПРИМЕР,  
НА ПЛОСКУЮ ИЛИ  
ДЛИННУЮ И УЗКУЮ.

КСТАТИ, ИЗОБРЕЛИ  
НЕОДИМОВЫЙ МАГНИТ  
В ЯПОНИИ.

И ОБЛАСТЬ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ  
С НЕОДИМОВЫМИ  
МАГНИТАМИ  
ЗНАЧИТЕЛЬНО  
РАСШИРИЛИ  
ТОЖЕ ИМЕННО  
В ЯПОНИИ.



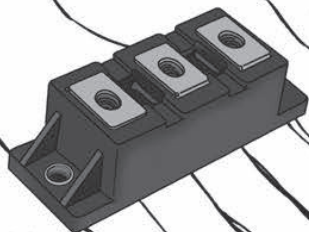
НАДО ЖЕ... ВСЁ БЛАГОДАРЯ  
ЭТОМУ МАГНИТУ?..



ДАА, ЧТО КАСАЕТСЯ  
ТЕХНОЛОГИЙ, ЯПОНИЯ  
ВСЁ-ТАКИ МОЛОДЕЦ.



ВТОРОЕ ВАЖНОЕ  
СОБЫТИЕ - ЭТО...



...ПОЯВЛЕНИЕ БИПОЛЯРНЫХ  
ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ  
ЗАТВОРОМ (IGBT).

БЛАГОДАРЯ ЭТИМ НОВЫМ  
ПОЛУПРОВОДНИКАМ СТАЛО  
ВОЗМОЖНО СВОБОДНО  
УПРАВЛЯТЬ ТОКОМ  
В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ.



ВЫ И В САМОМ ДЕЛЕ ФАНАТ  
ДВИГАТЕЛЕЙ! ДАЖЕ ТАКАЯ  
ШТУКА У ВАС ЕСТЬ.

А ТРЕТЬЕ ВАЖНОЕ СОБЫТИЕ -  
ЭТО РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ.



ДА И  
ОПЕРАЦИОННЫЕ  
СИСТЕМЫ ТОЖЕ  
ПОСТОЯННО  
ОБНОВЛЯЮТСЯ.



ТАКИМ ОБРАЗОМ,  
ИЗ-ЗА ЭТИХ ТРЁХ ВАЖНЫХ  
СОБЫТИЙ, ИЛИ, ДРУГИМИ  
СЛОВАМИ, БЛАГОДАРЯ  
РАЗВИТИЮ ТЕХНОЛОГИЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ  
К ХХІ ВЕКУ  
ЭВОЛЮЦИОНИРОВАЛИ!

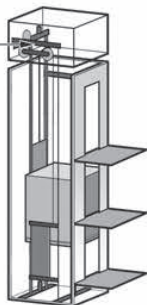
РАССМОТРИМ ЭВОЛЮЦИЮ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
НА КАКОМ-НИБУДЬ ПРИМЕРЕ.

ВОТ,  
НАПРИМЕР,  
ЛИФТ БЕЗ  
МАШИННОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ!

В МЕТРО С НЕДАВНИХ ПОР  
ПОЯВИЛОСЬ МНОЖЕСТВО  
ЛИФТОВ, ВЕДУЩИХ ОТ  
ТУРНИКЕТОВ ПРЯМО НА  
ПЛАТФОРМУ, ТАК?

ЭТО ТОЖЕ  
СТАЛО ВОЗМОЖНЫМ  
БЛАГОДАРЯ ЭВОЛЮЦИИ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.

Машинное  
отделение



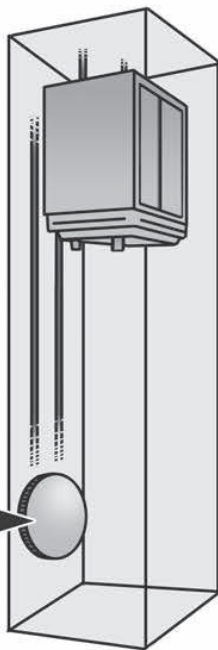
ОБЫЧНО В ВЕРХНЕЙ  
ЧАСТИ ЛИФТА НАХОДИТСЯ  
МАШИННОЕ ОТДЕЛЕНИЕ,  
ГДЕ И УСТАНАВЛИВАЮТСЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ  
И РЕДУКТОР.

И ПОЭТОМУ,  
ЧТОБЫ УСТАНОВИТЬ  
ЛИФТ В МЕТРО,  
РАНЬШЕ ТРЕБОВАЛОСЬ  
НАД ЗЕМЛЁЙ  
СООРУЖАТЬ  
МАШИННОЕ ОТДЕЛЕНИЕ,  
ЧТО ВЕСЬМА  
ЗАТРУДНИТЕЛЬНО.



НО БЛАГОДАРЯ  
ПОЯВЛЕНИЮ  
НЕОДИМОВЫХ  
МАГНИТОВ СТАЛО  
ВОЗМОЖНО ДЕЛАТЬ  
ПЛОСКИЕ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ,  
КОТОРЫЕ МОЖНО  
РАЗМЕЩАТЬ ПРЯМО  
В ШАХТЕ ЛИФТА.

Плоский  
электродвигатель



А РЕГУЛИРОВАТЬ  
СКОРОСТЬ  
ДВИЖЕНИЯ ЛИФТА  
ТЕПЕРЬ  
ВОЗМОЖНО  
С ПОМОЩЬЮ  
КОМПЬЮТЕРОВ,  
И РЕДУКТОРЫ  
БОЛЬШЕ  
НЕ НУЖНЫ.

ТАКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЕМ БЕЗ РЕДУКТОРА  
НАЗЫВАЕТСЯ "ПРЯМЫМ ПРИВОДОМ".

ТАК, БЛАГОДАРЯ РАЗВИТИЮ  
ТЕХНОЛОГИЙ...

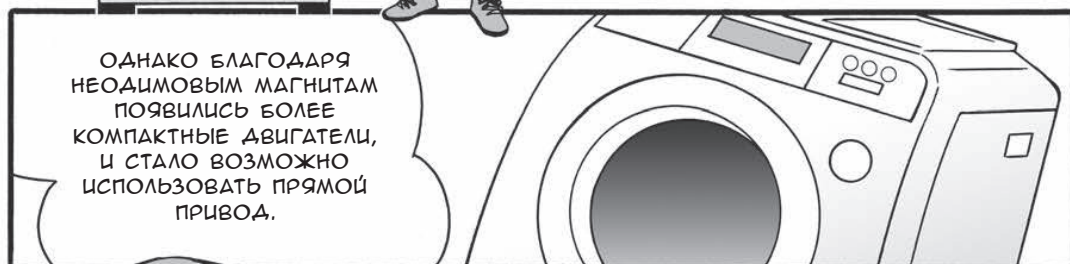


...СТАЛО ВОЗМОЖНЫМ  
СОЗДАНИЕ ЛИФТОВ БЕЗ  
МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ.



НАДО ЖЕ...  
ЭВОЛЮЦИЮ ТЕХНОЛОГИЙ, ЗНАЧИТ,  
И В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ  
МОЖНО УВИДЕТЬ.

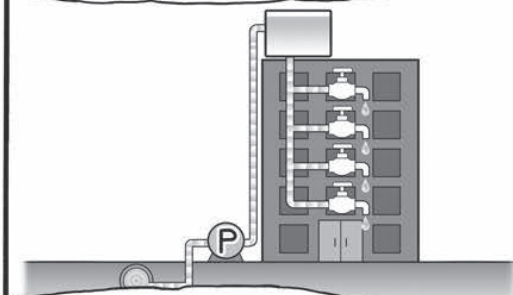




И ТО, ЧТО НА КРЫШАХ  
СОВРЕМЕННЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ  
ЗДАНИЙ БОЛЬШЕ НЕТ БАКОВ С  
ВОДОЙ, - ТОЖЕ ЗАСЛУГА НОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ.



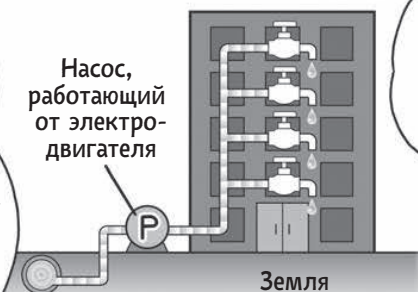
РАНЬШЕ ВОДА ЗАКАЧИВАЛАСЬ  
В ВОДЯНОЙ БАК, УСТАНОВЛЕННЫЙ  
НА КРЫШЕ ДОМА...



...А ЗАТЕМ, БЛАГОДАРЯ  
ДАВЛЕНИЮ ИЗ-ЗА РАЗНИЦЫ  
В УРОВНЯХ, ВОДА ПОСТУПАЛА  
ПО ВОДОПРОВОДНЫМ ТРУБАМ.

СОВРЕМЕННЫЕ ЖЕ НАСОСЫ  
РАБОТАЮТ ПОСТОЯННО  
И НАПРЯМУЮ ПОВЫШАЮТ  
ДАВЛЕНИЕ В ТРУБАХ,  
И ЭТО ДАВЛЕНИЕ  
МОЖНО РЕГУЛИРОВАТЬ  
И ПОДДЕРЖИВАТЬ  
НА НЕОБХОДИМОМ УРОВНЕ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
КОЛИЧЕСТВА  
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.

Насос,  
работающий  
от электро-  
двигателя



ТАК ВОТ  
ПОЧЕМУ СТАЛИ  
НЕ НУЖНЫ  
ВОДЯНЫЕ  
БАКИ!



А ЕЩЁ ТО, ЧТО В ГАЗЕТАХ СТАЛО  
ВОЗМОЖНЫМ ИСПОЛЬЗОВАТЬ БОЛЬШЕ  
ЦВЕТОВ ПРИ ПЕЧАТЕ, ТОЖЕ ПРОИЗОШЛО  
БЛАГОДАРЯ НОВЫМ ЭЛЕКТРОАВИАТЕЛЯМ!

НЕ МОЖЕТ БЫТЬ?!



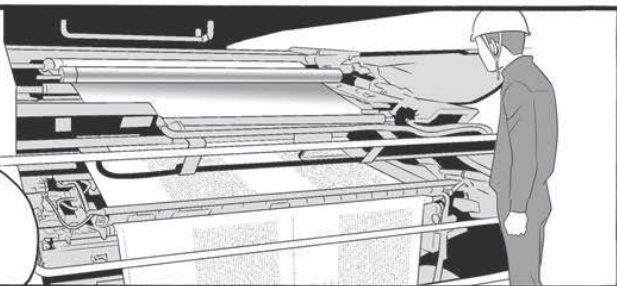
ГАЗЕТЫ ИСПОЛЬЗУЮТ ТАК НАЗЫВАЕМУЮ  
"РОТАЦИОННУЮ ПЕЧАТНУЮ МАШИНУ",  
В КОТОРОЙ ЗАДЕЙСТВОВАНО  
БОЛЕЕ 50 ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АВИАТЕЛЕЙ!

ТАКАЯ МАШИНА ПЕЧАТАЕТ  
СО СКОРОСТЬЮ  
ДО 10 000 ЛИСТОВ В МИНУТУ.



НО ДЛЯ ЦВЕТНОЙ ПЕЧАТИ,  
КРОМЕ ЧЁРНЫХ ЧЕРНИЛ,  
НУЖНЫ ЕЩЁ ГОЛУБЫЕ,  
ПУРПУРНЫЕ И ЖЁЛТЫЕ.

И ВСЕ ИХ НУЖНО  
ЗАФИКСИРОВАТЬ  
В ОПРЕДЕЛЕННОМ  
ПОЛОЖЕНИИ.



ПОЭТОМУ РАНЬШЕ, ЧТОБЫ  
ПРИ ЦВЕТНОЙ ПЕЧАТИ  
ИЗБЕЖАТЬ СМЕШЕНИЯ ЦВЕТОВ,  
НУЖНО БЫЛО ПЕЧАТАТЬ  
ОЧЕНЬ МЕДЛЕННО.



И ПОЭТОМУ ДЕЛАЛИ ЭТО  
РАЗ В НЕДЕЛЮ ТОЛЬКО  
ДЛЯ ВОСКРЕСНЫХ  
ВЫПУСКОВ.

НО С УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
УПРАВЛЕНИЕ РОТАЦИОННЫМИ ПЕЧАТНЫМИ МАШИНАМИ  
СТАЛО ОЧЕНЬ ТОЧНЫМ, И ПОЭТОМУ СЕЙЧАС СТАЛО  
ВОЗМОЖНЫМ КАЖДЫЙ ДЕНЬ ПЕЧАТАТЬ ЦВЕТНЫЕ ВЫПУСКИ!

НАДО ЖЕ, КАКИЕ  
ЭТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ДВИГАТЕЛИ!  
И В БЫТУ,  
И В ВОДОПРОВОДЕ,  
И В ГАЗЕТАХ...



АП!



СКАЖИТЕ, ДА?!!

БУДЕТЕ ДАЛЬШЕ  
СЛУШАТЬ?  
ПРО ДВИГАТЕЛИ.



оу!

ТОЛЬКО МЕШАЕТЕ РАБОТАТЬ!

Эй, вы!  
Если ничего  
не покупаете,  
то и нечего  
тут торчать!

ГРРР

НО...

ПАПА...

...СОВСЕМ...

...НЕ ПОХОЖИ..!

Хм?!

# ДОПОЛНЕНИЕ



## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ХХІ ВЕКА

Можно сказать, что развитие нашей цивилизации – это накопление способов использования энергии. Началось всё с использования энергии открытого огня, затем, благодаря изобретению колеса, люди научились перемещать большие и тяжёлые предметы. Уже в Новое время был изобретён паровой двигатель, что привело к промышленной революции. А после был изобретён электрический генератор, позволяющий преобразовывать энергию природных ресурсов (нефти, каменного угля, воды и т. д.) в электрическую энергию.

И таким образом наша современная жизнь оказалась в очень большой степени зависима от электрической энергии. Кроме того, как было показано на странице 10, бóльшая часть вырабатываемой электрической энергии потребляется электрическими двигателями.

Около полувека тому назад, в 60-е годы прошлого столетия, было три предмета, которые называли «домашними сокровищами», потому что каждая семья мечтала их иметь. Это автоматическая стиральная машина, холодильник и чёрно-белый телевизор. В двух из них находятся электрические двигатели. Таким образом, если в доме было два электродвигателя, то можно сказать, что данная семья жила современно и с комфортом. Затем в нашу жизнь проникли вентиляторы, проигрыватели и прочая техника, и число электродвигателей возросло в каждом доме. В настоящее время уже не понятно, сколько электрических двигателей вокруг нас, где они находятся и как используются. Мы живём, не осознавая роли электродвигателей в нашей современной жизни. И дома, и на работе, и на улице используется большое количество электрических двигателей. Однако мы не замечаем их существования, потому что большинство из них скрыто внутри приборов и предметов.

В таких бытовых приборах, как вентилятор или стиральная машина, где присутствуют видимые вращающиеся элементы, наличие электродвигателей очевидно. Однако и в таких постоянно используемых предметах, как мобильный телефон, тоже находятся электродвигатели. Телефон вибрирует благодаря скрытому внутри маленькому, примерно 2 мм диаметром, электродвигателю. Другими словами, в современном мире мы всегда имеем при себе как минимум один электрический двигатель.

Также и транспортные средства в современном мире всё чаще работают не на двигателях внутреннего сгорания, а на электрических двигателях. Все уже знают про электрические поезда и электромобили, но оказывается, есть уже и корабли, работающие на электрических двигателях. Кроме того, и в обычных автомобилях на двигателях внутреннего сгорания используется более 100 электродвигателей. Если выйти в город, тоже можно увидеть в работе множество электрических двигателей. Так, например, эскалаторы и лифты работают от электродвигателей. Кроме того, и водоснабжение в современном здании осуществляется благодаря насосу, работающему от электродвигателя. Именно поэтому при отключении электричества прекращается водоснабжение, так как электродвигатель перестаёт работать.

На самом деле такой рост использования электрических двигателей произошёл сравнительно недавно. Прямо накануне наступления XXI века электродвигатели подверглись нескольким значительным изменениям. Это: 1) изобретение мощного неодимового магнита; 2) развитие компьютеров; 3) изобретение регулирующих ток полупроводников (IGBT).

Неодимовые магниты состоят из сплава неодима, железа и бора (Nd-Fe-B). Они в 10 раз мощнее, чем самые популярные до их появления ферриты. Благодаря неодимовым магнитам стало возможным делать электродвигатели маленьких размеров, что, в свою очередь, облегчило использование электродвигателей в приборах. А быстрый прогресс информационных технологий привёл к тому, что и компьютерные технологии, регулирующие работу электрических двигателей, тоже значительно усовершенствовались. А IGBT<sup>1</sup> и компьютерные технологии в совокупности привели к прорыву в силовой электронике и сделали возможным свободное регулирование работы электрических двигателей.

Чтобы привести электрический двигатель в движение, нужен электрический ток. Электрический двигатель был изобретён в XVIII веке, когда единственным источником электрического тока были аккумуляторы, производившие только постоянный ток. И соответственно, все электрические двигатели тогда были электродвигателями постоянного тока. Позднее были изобретены генераторы переменного тока, и вслед за ними появились и электродвигатели переменного тока. Поэтому прежде всего электрические двигатели подразделяют на две категории в зависимости от используемого источника электроэнергии: на электродвигатели постоянного тока и электродвигатели переменного тока.



## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В этой книге мы рассмотрим 4 вида электрических двигателей: электродвигатели постоянного тока, бесколлекторные электродвигатели, синхронные электродвигатели и асинхронные электродвигатели. В табл. 1.1 представлена классификация электрических двигателей, где рассматриваемые в данной книге 4 вида электрических двигателей подразделяются на более мелкие категории.

Среди электрических двигателей постоянного тока есть такие, в которых не используется магнит, а используется катушка (обмотка). Такая катушка используется в качестве электромагнита.

Аналогично и среди синхронных электродвигателей есть такие, в которых вместо магнита используется катушка. Но, кроме того, существуют и такие синхронные электродвигатели, в роторах которых не используется ни магнит, ни катушка, они называются «реактивными синхронными электродвигателями». И среди асинхронных электрических двигателей существуют асинхронные электродвигатели с обмоткой.

Кроме того, существуют и такие разные по принципам вращения и структуре электрические двигатели, как шаговый электродвигатель и линейный электродвигатель. Другими словами, существует очень много видов электрических двигателей.

---

<sup>1</sup> IGBT означает биполярный транзистор с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor). Это часто используемый полупроводник, так как с его помощью можно регулировать электрический ток.



# ТАБЛИЦА 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

| Электрические двигатели, рассматриваемые в этой книге | Подгруппы                                                        | Названия                                                 |                                       |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Электро-двигатель постоянного тока                    | Виды статоров                                                    | Электродвигатель постоянного тока на постоянных магнитах |                                       |
|                                                       |                                                                  | С катушкой (обмоткой)                                    | С последовательным включением обмоток |
|                                                       |                                                                  |                                                          | С параллельным включением обмоток     |
|                                                       |                                                                  |                                                          | Со смешанным включением обмоток       |
| Синхронный электро-двигатель                          | Виды роторов                                                     | С поверхностными постоянными магнитами (SPM)             |                                       |
|                                                       |                                                                  | С внутренними постоянными магнитами (IPM)                |                                       |
|                                                       |                                                                  | Электродвигатель с фазным ротором                        |                                       |
|                                                       |                                                                  | Реактивные синхронные электродвигатели                   |                                       |
| Асинхронный электро-двигатель                         |                                                                  | Электродвигатель с короткозамкнутым ротором              |                                       |
|                                                       |                                                                  | Асинхронный электродвигатель с фазным ротором            |                                       |
| Бесколлекторный электродвигатель                      |                                                                  | Бесколлекторный электродвигатель                         |                                       |
|                                                       | Электрические двигатели с иными принципами вращения и структурой | Шаговый электродвигатель                                 |                                       |
|                                                       |                                                                  | Вентильный реактивный электродвигатель (SRM)             |                                       |
|                                                       |                                                                  | Линейный электродвигатель                                |                                       |

Электрические двигатели, упомянутые в выделенных тёмным фоном ячейках, будут рассмотрены в этой книге.

До недавних пор электродвигатели также подразделяли в зависимости от источников электроэнергии. Но современные электрические двигатели подсоединяются к источнику электроэнергии не напрямую, а посредством схемы управления\*. И всё чаще появляются электрические двигатели, которые при отсутствии такой схемы вообще не могут работать. Если есть схема управления, то не имеет значения, какой ток, постоянный или переменный, поступает от источника электроэнергии, так как с помощью нее ток можно изменить. На схеме 1.1 на примере электропоезда продемонстрирована роль схемы управления. По проводам над электропоездом течёт постоянный электрический ток. Другой проводник электроэнергии – это рельсы. Через токоприёмник в форме пантографа в электропоезд поступает постоянный электрический ток. И есть электрические поезда, которые, используя этот постоянный ток, работают на электродвигателях постоянного тока. Но с недавних пор с помощью схем управления стало возможным менять ток на переменный, и это привело к увеличению числа электропоездов, работающих на электродвигателях переменного тока.

Поэтому при подразделении электрических двигателей на «электродвигатели постоянного тока» и «электродвигатели переменного тока» имеется в виду не вид тока, поступающий от источника электроэнергии, а вид тока, используемый данным видом электродвигателя. В этой книге мы рассмотрим электрические двигатели относительно небольшой мощности, которые часто используются в непосредственной близости от нас. И я постараюсь максимально доступно объяснить их устройство и принципы работы.

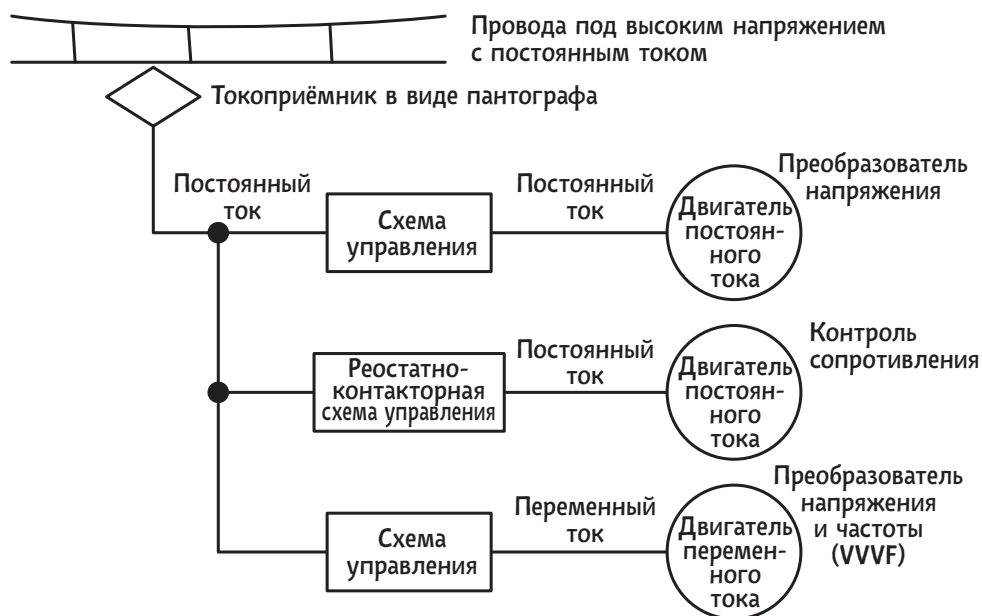
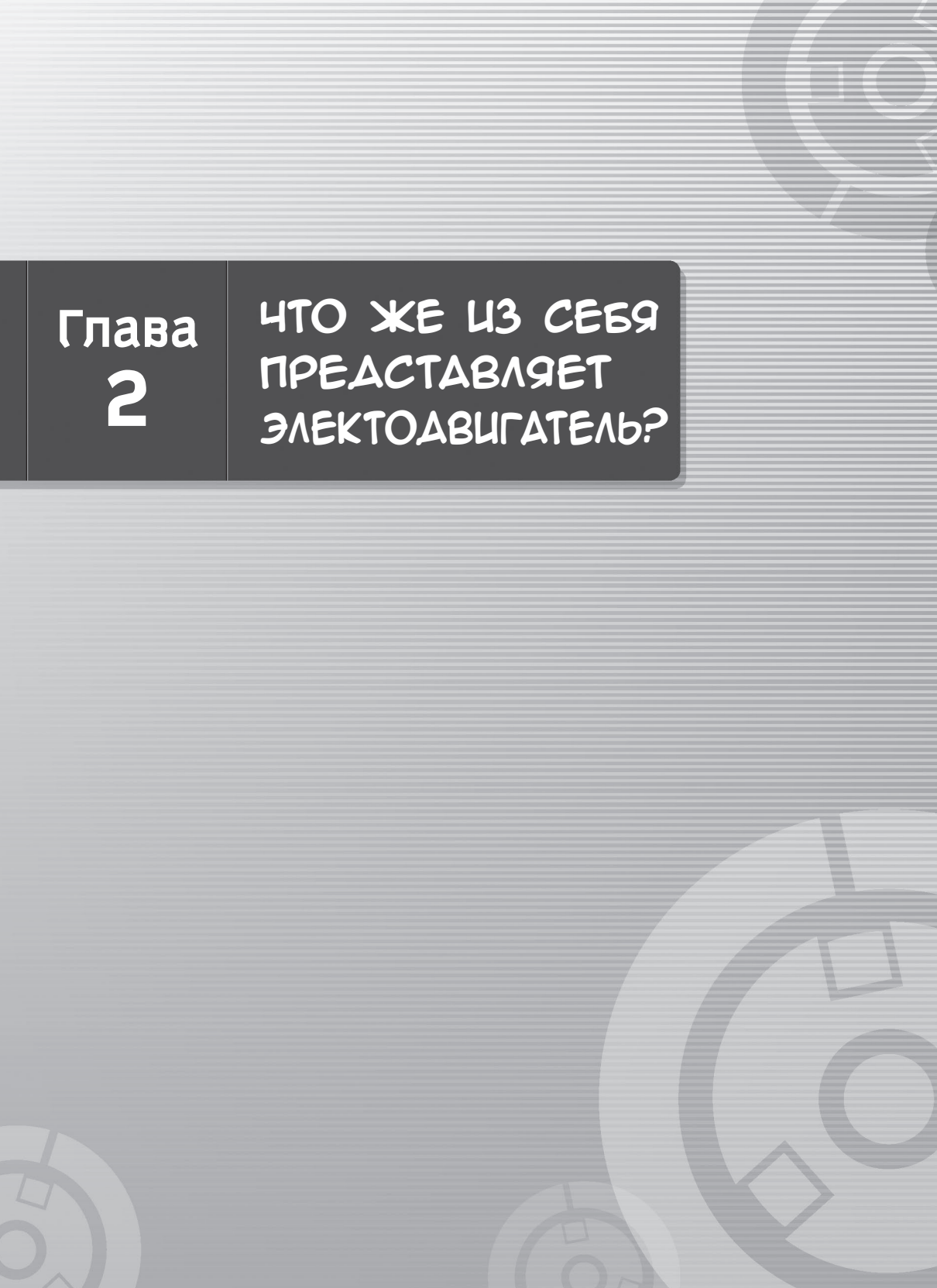


Схема 1.1. Роль управляющей схемы в работе электропоезда

## Глава 2

## ЧТО ЖЕ ИЗ СЕБЯ ПРЕДСТАВЛЯЕТ ЭЛЕКТОДВИГАТЕЛЬ?



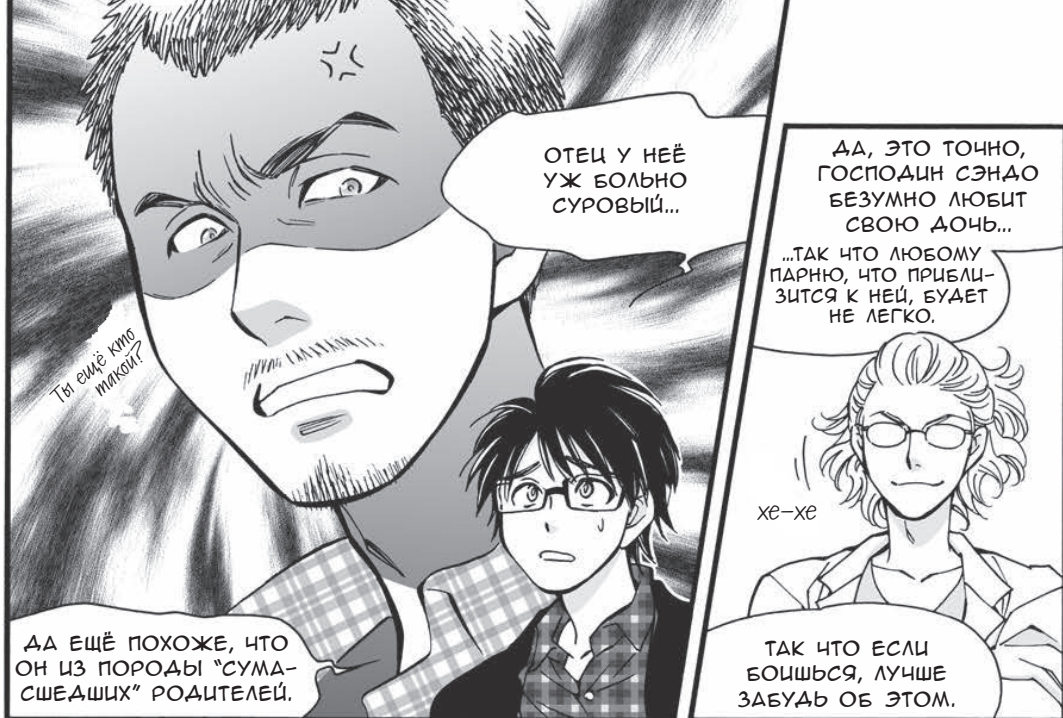


## 2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ - ЭТО...

ника Сэндо  
ая техника

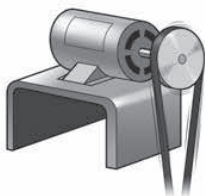
Сэндо  
Электроника  
и бытовая техника







БЛАГОДАРЯ ПОТОКУ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
АВЫГАТЕЛЬ НАЧИНАЕТ  
ВРАЩАТЬСЯ.



ТО ЕСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
АВЫГАТЕЛЬ ПРЕВРАЩАЕТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ  
В МЕХАНИЧЕСКУЮ.



Электричество

НО ЭТО НЕ ЗНАЧИТ,  
ЧТО ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ  
ПРЕВРАЩАЕТСЯ В МЕХАНИЧЕСКУЮ  
НЕПОСРЕДСТВЕННО.

НА САМОМ ДЕЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ЭНЕРГИЯ ПРЕВРАЩАЕТСЯ СНАЧАЛА  
В ЭНЕРГИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ,  
А ЗАТЕМ УЖЕ  
В МЕХАНИЧЕСКУЮ  
ЭНЕРГИЮ.



ПО СРАВНЕНИЮ  
С ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ,  
С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГИИ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
МОЖНО ПОЛУЧИТЬ  
БОЛЬШЕ ЭНЕРГИИ.



ХМ...?

ВЫ ЧТО ТУТ,  
ОБ ЭЛЕКТРОАВЫГАТЕЛЯХ  
ГОВОРИТЕ?!  
А НУ-КА ПЕРЕСТАНЬТЕ!  
ЗА МОЕЙ-ТО СПИНОЙ!

КО-КОЦУР?!



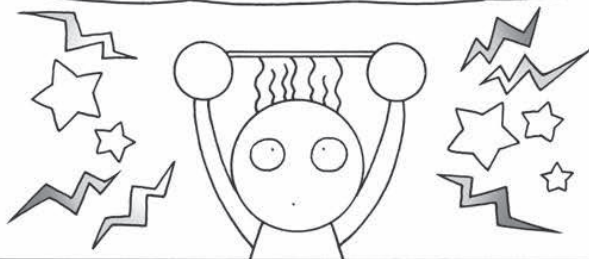


ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
САМО ПО СЕБЕ  
ТОЖЕ МОЖЕТ  
ПОРОЖДАТЬ  
ЭНЕРГИЮ  
ДВИЖЕНИЯ.

НАПРИМЕР...



...ЕСЛИ ПОТЕРЕТЬ ПЛАСТИКОВУЮ  
ПОВЕРХНОСТЬ, ТО ВОЗНИКНЕТ СТАТИЧЕСКОЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, КОТОРОЕ МОЖЕТ  
ПРЯТЯГИВАТЬ ВОЛОСЫ.



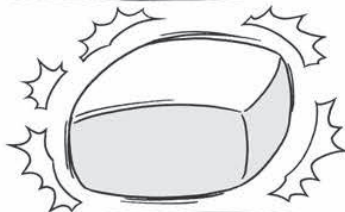
ОДНАКО ПО МЕРЕ НАКОПЛЕНИЯ  
СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА  
ПРИ ВЫСОКОМ НАПРЯЖЕНИИ МОЖЕТ  
ВОЗНИКНУТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД.



ТАК, ПРИМЕРОМ ОЧЕНЬ  
СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
РАЗРЯДА ЯВЛЯЕТСЯ МОЛНИЯ.

ПРИ ЭТОМ  
НАКАПЛИВАТЬ  
ЭНЕРГИЮ,  
ИСПОЛЬЗУЯ  
МАГНЕТИЗМ,  
ГОРАЗДО  
ПРОЩЕ, ЧЕМ  
ИСПОЛЬЗУЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

КРОМЕ ТОГО,  
ХОТЯ И СУЩЕСТВУЕТ ПОНЯТИЕ  
"МАГНИТНОГО НАСЫЩЕНИЯ" -  
ТО ЕСТЬ МАКСИМАЛЬНО  
ВОЗМОЖНОГО ЗНАЧЕНИЯ  
НАМАГНИЧЕННОСТИ,



НО ЕСЛИ НЕКИЙ  
МАГНИТ НАМАГНИТИТЬ  
ДО ПОЧТИ НАСЫЩЕНИЯ,  
ТО ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ...

...БУДЕТ В 400 000 РАЗ  
ВЫШЕ ЭНЕРГИИ СТАТИЧЕСКОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА!

В 400 000 РАЗ?!

НИ-НИЧЕГО СЕБЕ!  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
ТАКОЕ МОШНОЕ.

СКАЖИ?!  
ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ ОЧЕНЬ ПЛОТНАЯ...

...ПОЭТОМУ-ТО В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЯХ  
ВСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ИЛИ ЕЁ  
ЧАСТЬ СНАЧАЛА ПРЕОБРАЗУЕТСЯ  
В ЭНЕРГИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ,  
А ТОЛЬКО ПОТОМ УЖЕ  
В МЕХАНИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ!

Электричество  $\Rightarrow$  Магнетизм  $\Rightarrow$  Движение

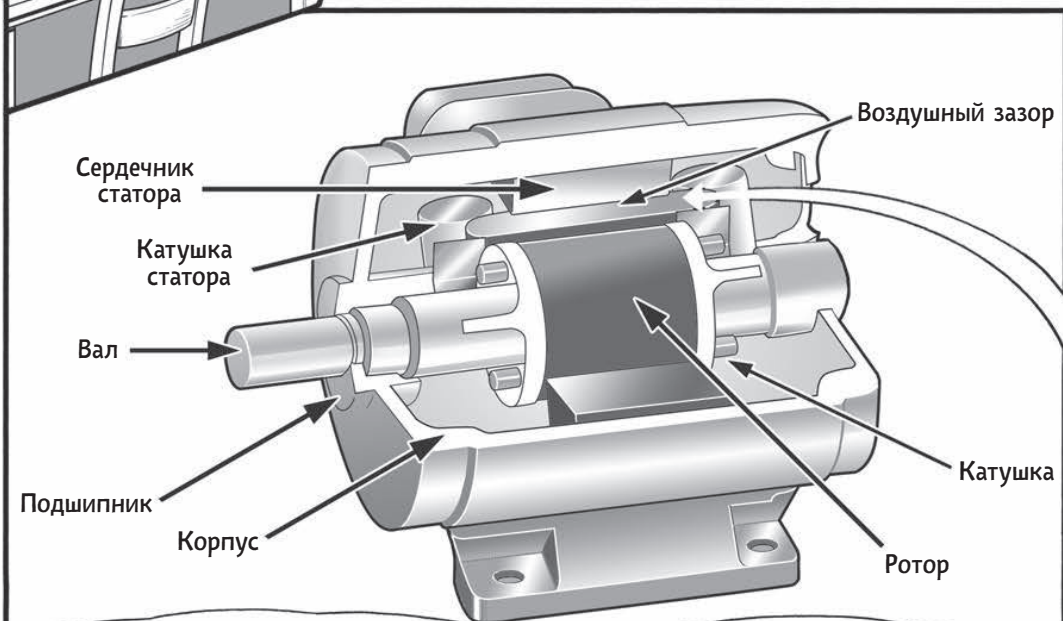
НО... А В САМОМ НАЧАЛЕ  
КАК ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
ПРЕВРАЩАЕТСЯ  
В МАГНЕТИЗМ?

ВОТ КАК.  
ЭТО ТЫ ТОЖЕ НЕ ЗНАЕШЬ.

ЧТО Ж, ТОГДА  
ЗАЙДЁШЬ?  
В МОЮ КОМНАТУ?

!?

## 2.2. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ



ЕСЛИ ОБОБЩИТЬ, ТО ВНУТРЕННЕЕ УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МОЖНО РАЗДЕЛИТЬ НА ДВЕ БОЛЬШИЕ ЧАСТИ:

ЭТО НЕПОДВИЖНАЯ ЧАСТЬ "СТАТОР" И ПОДВИЖНАЯ ЧАСТЬ "РОТОР".

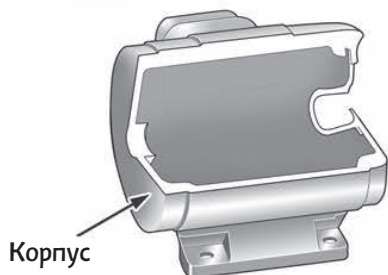
ИЗ-ЗА ТОГО, ЧТО МЕЖДУ СТАТОРОМ И РОТОРОМ ЕСТЬ НЕБОЛЬШОЕ ПРОСТРАНСТВО, ОНИ НЕ СОЕДИНЕНЫ НЕПОСРЕДСТВЕННО ДРУГ С ДРУГОМ.

Статор  
Ротор

В ЭТОМ ПРОСТРАНСТВЕ НАХОДИТСЯ ВОЗДУХ, ПОЭТОМУ ОНО НАЗЫВАЕТСЯ "ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР".

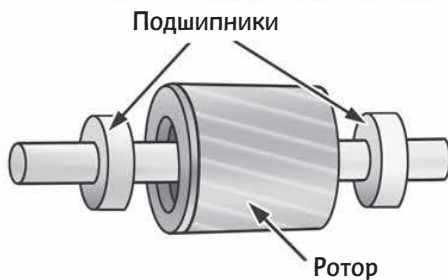


НО КРОМЕ СТАТОРА И РОТОРА,  
ЕСТЬ ЕЩЁ НЕСКОЛЬКО  
НЕОБХОДИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В СТРУКТУРЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.



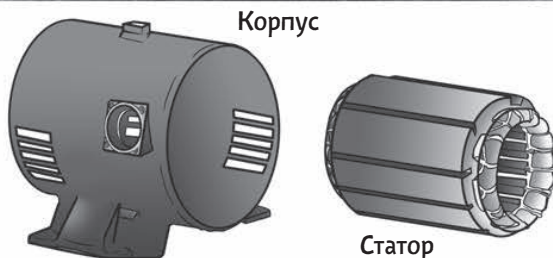
ТАК, ЧТОБЫ ЗАФИКСИРОВАТЬ СТАТОР,  
НЕОБХОДИМ ВНЕШНИЙ КОРПУС.

ДЛЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА  
НЕОБХОДИМЫ ВАЛ  
И ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ЕГО  
ПОДШИПНИКИ.



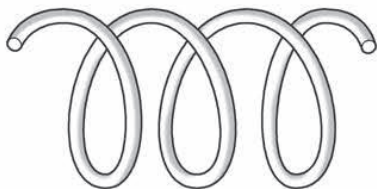
БЛАГОДАРЯ ПОДШИПНИКАМ ПОЗИЦИИ  
СТАТОРА И РОТОРА ЗАФИКСИРОВАНЫ.

БЫВАЕТ,  
ЧТО СТАТОР СДЕЛАН  
ИЗ ПОСТОЯННОГО  
МАГНИТА,  
НО В ДАННОМ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ СТАТОР  
СОСТОИТ ИЗ КАТУШКИ  
И СЕРДЕЧНИКА.



КАТУШКА ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ  
ОБОТКУ ВОКРУГ ЖЕЛЕЗНОГО  
СЕРДЕЧНИКА.

ПРОВОДА ЭТОЙ ОБОТКИ  
И СЛУЖАТ ДЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.



РОТОР ТОЖЕ МОЖЕТ СОСТОЯТЬ  
ИЗ МАГНИТА ИЛИ ИЗ СЕРДЕЧНИКА  
И КАТУШКИ.



ЗНАЧИТ, ИЛИ МАГНИТ,  
ИЛИ КАТУШКА И СЕРДЕЧНИК.

ПОЛУЧАЕТСЯ, И СТАТОР, И РОТОР МОГУТ  
БЫТЬ СДЕЛАНЫ ИЗ ОДНИХ МАТЕРИАЛОВ, ТАК?

## 2.3. ПРИНЦИП ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

А ТЕПЕРЬ ПЕРЕИДЁМ  
К ВЗАИМООТНОШЕНИЯМ  
МЕЖАУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ  
И МАГНЕТИЗМОМ.

КОГДА  
ПО ПРОВОДУ ИДЁТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК...



...ВОКРУГ НЕГО  
ВОЗНИКАЕТ МАГНИТНОЕ  
ПОЛЕ, ПОДОБНОЕ  
ТОМУ, КАК ВОКРУГ  
ЭТОГО МАГНИТА.

**КЛАЦ**

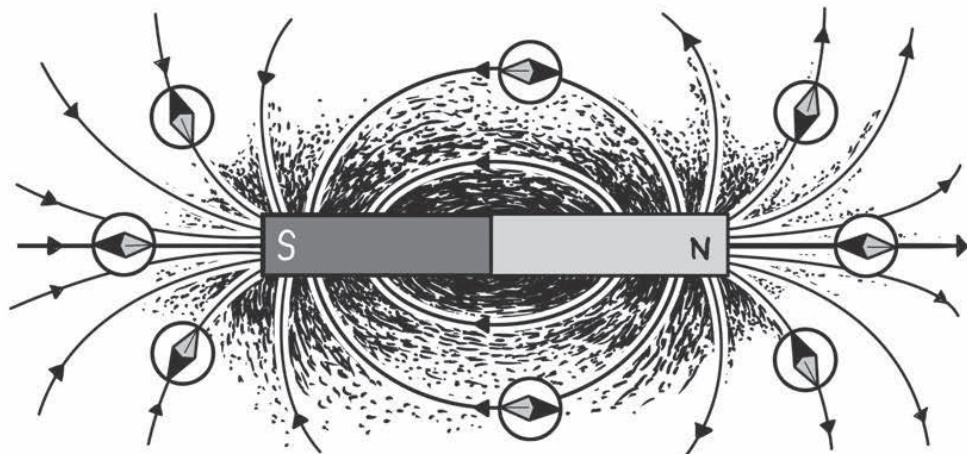


ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
МАГНЕТИЗМ ВОЗНИКАЕТ  
В ПРОСТРАНСТВЕ  
ВОКРУГ.



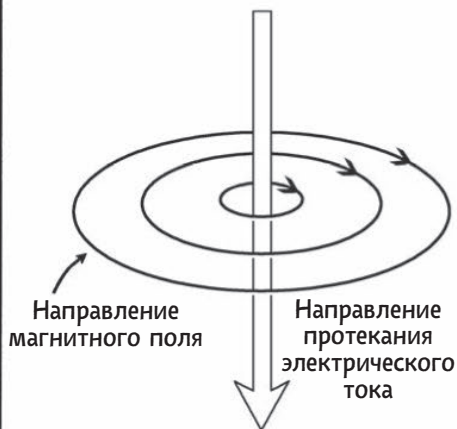
**ШУР-ШУР**

НАСЫПЛЕМ  
ЖЕЛЕЗНЫЕ ОПИЛКИ.

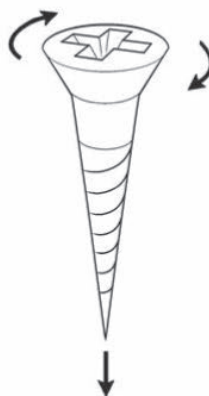


ВОКРУГ МАГНИТА ОТ ПОЛЮСА "N" К ПОЛЮСУ "S" ИДУТ СИЛОВЫЕ  
ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПОЭТОМУ И РАССЫПАННЫЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ  
ОПИЛКИ ВЫСТРАИВАЮТСЯ В СООТВЕТСТВИИ С ЭТИМИ ЛИНИЯМИ.

КОГДА ПОЙДЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
ТОК, ТО С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ  
ВОКРУГ ПРОИЗОЙДЁТ ВОТ ЧТО:  
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ СТАНУТ  
КОНЦЕНТРИЧЕСКИМИ  
ОКРУЖНОСТЯМИ.



НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ СИЛОВЫХ  
ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ТАК НАЗЫВАЕНЫМ  
"ПРАВИЛОМ БУРАВНИКА (ВИНТА)".



Направление  
вращения винта

Направление  
магнитного поля

Направление  
движения винта

Направление тока

ЕСЛИ НАПРАВЛЕНИЕ  
ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ВИНТА  
СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ ДВИЖЕНИЯ  
ТОКА, ТО НАПРАВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ВИНТА  
СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ  
ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

ТАКИМ ВОТ  
ОБРАЗОМ ЭНЕРГИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
ПРЕОБРАЗУЕТСЯ  
В ЭНЕРГИЮ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ.



МАГНЕТИЗМ, КОНЕЧНО,  
КЛАССНАЯ ШТУКА.  
И ЖЕЛЕЗНЫЕ ОПИЛКИ  
ДВИГАЕТ, И СТЕЛКУ  
КОМПАСА...

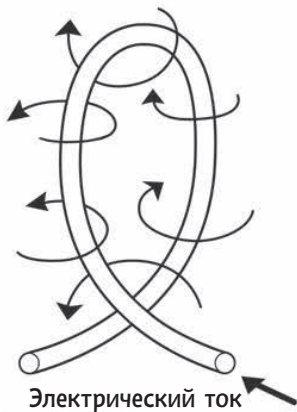
НО ЧТО ЖЕ БУДЕТ  
С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ  
В КАТУШКЕ? ВЕДЬ ТАМ  
ТОК ИДЁТ ПО ОБМОТКЕ,  
А НЕ ПО ПРЯМОЙ?



АГА,  
ХОРОШИЙ  
ВОПРОС!



ЕСЛИ ТОК ИДЁТ  
ПО ИЗВИТЫМ  
ПРОВОДАМ,  
ТО МАГНИТНОЕ  
ПОЛЕ БУДЕТ  
КАК БЫ  
ОБВИВАТЬСЯ  
ВОКРУГ  
ПРОВОДОВ.

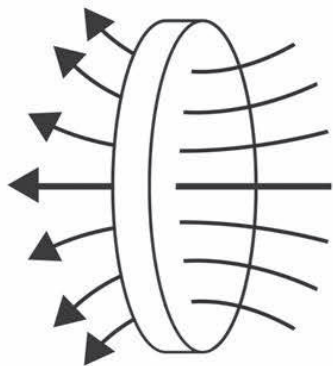


Оборот катушки

Электрический ток

ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
НА КРАЯХ ОБРАЗОВАННОЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРОВОДОМ  
ОКРУЖНОСТИ КАК БЫ  
ВОЗНИКАЮТ МАГНИТНЫЕ  
ПОЛЮСА.

И ТАК  
ПРОИСХОДИТ  
ВО ВСЕХ  
КАТУШКАХ,  
ПРОПУСКА-  
ЮЩИХ  
ТОК.

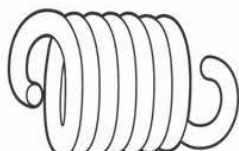


ОДИН ВИТОК  
КАТУШКИ ВЕДЁТ  
СЕБЯ ТАК ЖЕ,  
КАК УЗКИЙ  
ДИСКОПОДОБНЫЙ  
ПОСТОЯННЫЙ  
МАГНИТ.

ЕСЛИ ГОВОРИТЬ ТОЧНЕЕ,  
ТО ВИТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ПРОВОДА НАЗЫВАЕТСЯ  
КАТУШКОЙ...



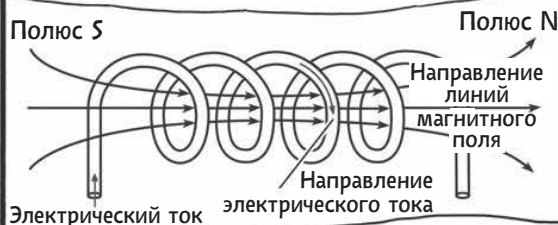
Катушка



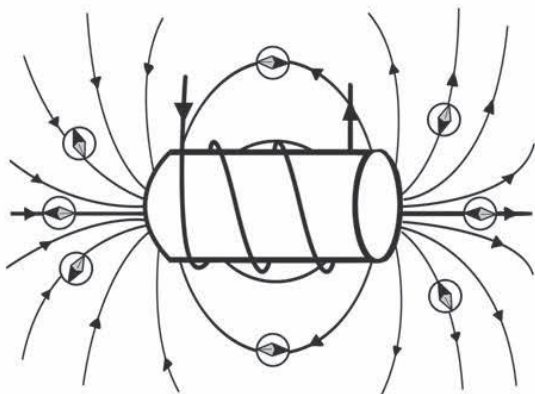
Соленоид

...А КОГДА ВИТКОВ МНОГО,  
ТО ЭТО УЖЕ БУДЕТ  
"СОЛЕНОИД".

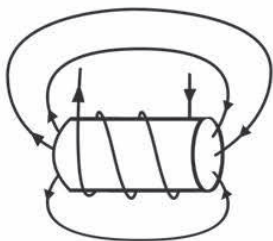
ЕСЛИ ПО СОЛЕНОИДУ  
ПУСТИТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК,  
ТО НА КАЖДОМ УЧАСТКЕ  
ВОЗНИКНЕТ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
С НАПРАВЛЕНИЕМ ЛИНИЙ,  
СОГЛАСНО ПРАВИЛУ ВИНТА.



И ВНУТРИ СОЛЕНОИДА СИЛОВЫЕ  
ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОТЕКУТ  
В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ!



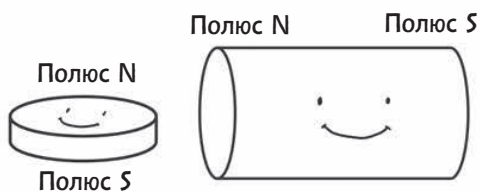
ТЕПЕРЬ ЕСЛИ ВЗГЛЯНУТЬ  
НА СОЛЕНОИД ЦЕЛИКОМ,  
ТО ВОТ ТАК  
БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
С ЕГО ВНЕШНЕЙ  
СТОРОНЫ.



КСТАТИ, ВОТ НА ЭТОМ РИСУНКЕ  
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ВЫХОДЯТ СЛЕВА КАТУШКИ  
И ВОЗВРАЩАЮТСЯ  
С ПРАВОЙ СТОРОНЫ.

ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО В ПРАВОЙ  
ЧАСТИ КАТУШКИ ВОЗНИКАЕТ  
ПОЛЮС N.

КОГДА ПО КАТУШКЕ ПРОХОДИТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, ТО ОНА  
ПОРОЖДАЕТ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ,  
ПОДОБНОЕ ТОМУ, КОТОРОЕ  
ВОЗНИКАЕТ В ДИСКООБРАЗНЫХ  
И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ  
МАГНИТАХ.



УСТРОЙСТВА С ТАКИМИ СВОЙСТВАМИ  
НАЗЫВАЮТСЯ "ЭЛЕКТРОМАГНИТАМИ".  
И В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ КАК РАЗ  
ИСПОЛЗУЮТСЯ ТАКИЕ МАГНИТНЫЕ  
ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ БЛАГОДАРЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ!



НО ВЕДЬ СИЛА  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ...

ОНА ЖЕ НЕ ПОСТОЯННА,  
РАЗВЕ НЕ ТАК?



КАКИМ ЖЕ ОБРАЗОМ ОНА ВЫЗЫВАЕТ ВРАЩЕНИЕ?

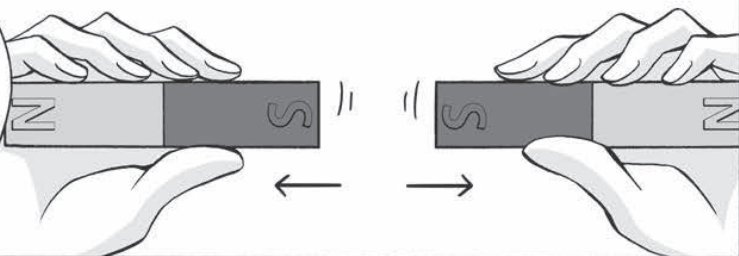
АГА,  
ОТЛИЧНО ПОДМЕЧЕНО!



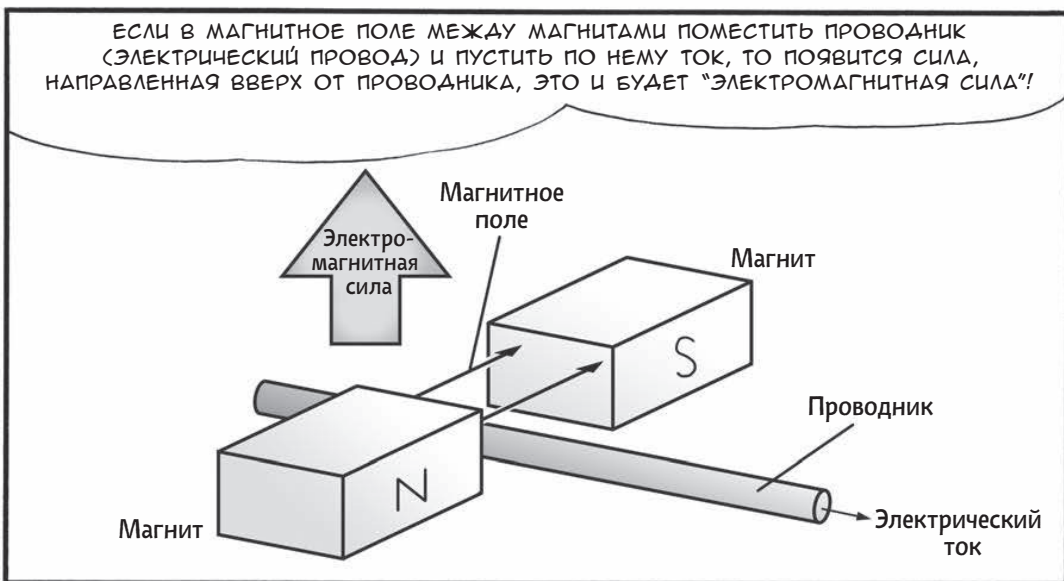
В САМОМ ДЕЛЕ,  
КОГДА РЕЧЬ ИДЁТ  
О СИЛЕ МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ, ТО ЭТО ЛИБО  
СИЛА МАГНИТНОГО  
ПРЯТЯЖЕНИЯ,  
КОТОРАЯ ПРЯТЯГИВАЕТ  
ДРУГ К ДРУГУ  
РАЗНОИМЁННЫЕ  
ПОЛЮСА N И S.,

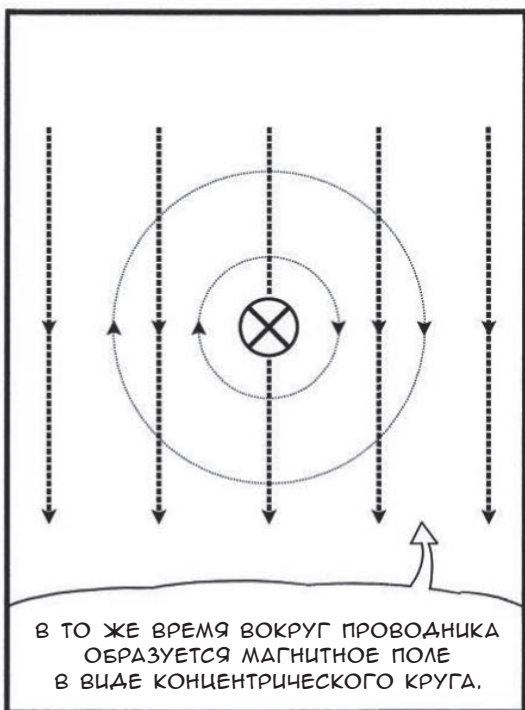


...ЛИБО СИЛА  
МАГНИТНОГО  
ОТТАЛКИВАНИЯ,  
КОТОРАЯ  
ДЕЙСТВУЕТ  
МЕЖДУ  
ОДНОИМЁННЫМИ  
ПОЛЮСАМИ.





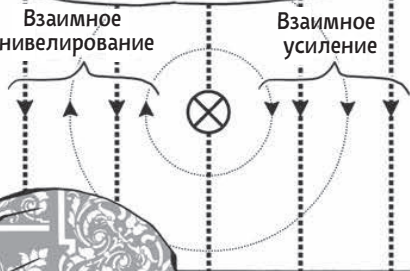




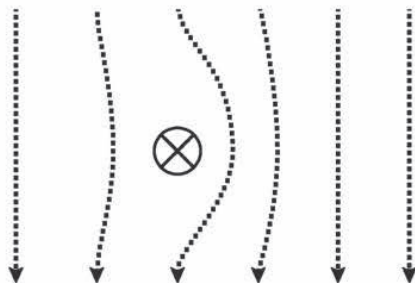
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИВЕДЁТ К ТОМУ, ЧТО СЛЕВА ОТ ЛИНИИ ТОКА МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ БУДУТ ДЕЙСТВОВАТЬ В РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ, А ЗНАЧИТ, ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ БУДЕТ ВЗАИМНО НИВЕЛИРОВАТЬСЯ. А СПРАВА МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ БУДУТ ДЕЙСТВОВАТЬ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ, ТО ЕСТЬ ИХ ДЕЙСТВИЕ БУДЕТ ВЗАИМНО УСИЛИВАТЬСЯ.

Взаимное  
нивелирование

Взаимное  
усиление



И ТАКИМ ОБРАЗОМ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ БУДЕТ КАК БЫ УПЛОТНЯТЬСЯ И ОТКЛОНЯТЬСЯ ВПРАВО.

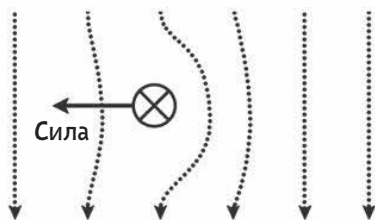


СИЛОВЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕДУТ СЕБЯ ПОДОБНО НАТЯНУТОЙ РЕЗИНКЕ.

ЕСЛИ СИЛОВУЮ ЛИНИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗОГНУТЬ И РАСТЯНУТЬ, ТО ПОЯВЛЯЕТСЯ СИЛА, СТРЕМЯЩАЯСЯ ЕЁ ВЫПРЯМИТЬ И СОКРАТИТЬ.

ПОЭТОМУ НА САМОМ ДЕЛЕ В ПРОВОДНИКЕ ВОЗНИКАЕТ СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ ВЛЕВО.

Сила



ДАННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА НАЗЫВАЕТСЯ "ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ МАКСВЕЛЛА".

НО ДАЖЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭТОЙ СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ БУДЕТ РАБОТАТЬ.

ПОЭТОМУ МОЖНО ОСОБО НЕ УГЛУБЛЯТЬСЯ В ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ МАКСВЕЛЛА.

ХОРОШО... ТАК КАК, КАЖЕТСЯ, ЭТО ДОВОЛЬНО СЛОЖНО....



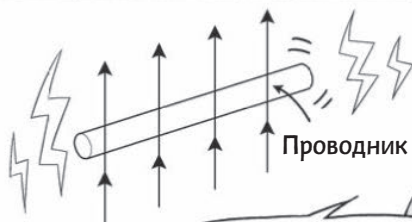
## 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ



Сила вращения      Электричество

МЕХАНИЧЕСКУЮ  
ЭНЕРГИЮ МОЖНО  
ПРЕОБРАЗОВАТЬ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ  
ЭНЕРГИЮ!

ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
ЕСЛИ ПРОВОДНИК  
ДВИЖЕТСЯ  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ,  
ТО НА КОНЦАХ  
ПРОВОДНИКА  
ВОЗНИКНЕТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ  
НАПРЯЖЕНИЕ.



ЧТО И ПРИВОДИТ  
К ПОЯВЛЕНИЮ ТАК НАЗЫВАЕМОЙ  
"ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ"!



А НАПРАВЛЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ  
СИЛЫ ЛЕГКО  
ОПРЕДЕЛИТЬ, ЕСЛИ  
СДЕЛАТЬ ТАК.

ОПЯТЬ?

ВОТ ГЛУПЫЙ... РАЗВЕ  
НЕ ВДАИШЬ, ЧТО РУКА  
ТЕПЕРЬ ДРУГАЯ!

$V$  — направление  
движения проводника

$B$  — направление магнитного поля

$E$  — направление  
электродвижущей  
силы

ЭТО "ПРАВИЛО  
ПРАВОЙ РУКИ ФЛЕМИНГА"!

ЕСЛИ БОЛЬШОЙ ПАЛЕЦ  
ПОКАЗЫВАЕТ  
НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ  
ПРОВОДНИКА,  
А УКАЗАТЕЛЬНЫЙ ПАЛЕЦ  
ПОКАЗЫВАЕТ НАПРАВЛЕНИЕ  
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ,  
ТОГДА СРЕДНИЙ ПАЛЕЦ  
БУДЕТ ОЗНАЧАТЬ  
НАПРАВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ.



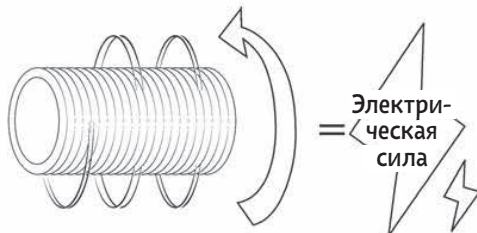
А, ВОТ ОНО ЧТО...



ЕСЛИ ТАКОЙ ПРОВОДНИК  
С ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛОЙ  
ПОДСОЕДИНИТЬ  
К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ,  
ТО ПОЙДЁТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.



И ПОЯВИВШЕЕСЯ ТАКИМ  
ОБРАЗОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
БУДЕТ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО  
СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ.



ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
ЕСЛИ ЗАПУСТИТЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
ДВИГАТЕЛЬ С ПОМОЩЬЮ  
ВНЕШНИХ СИЛ,  
ТО ОН ПРЕВРАТИТСЯ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
ГЕНЕРАТОР!

УХ ТЫ!  
НАААО ЖЕ!



Электри-  
ческая  
энергия

**ВЖИХ**

Электрическая  
энергия

В  
электрический  
двигатель

Кинети-  
ческая  
энергия

**ВЖИХ**

В  
электрический  
генератор

Энергия внешних  
источников

ХОТЯ ДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА  
ПО ПРЕОБРАЗОВАНИЮ ЭНЕРГИИ ПРЯМО ПРОТИВОПОЛОЖНЫ,  
НО ИХ КОНСТРУКЦИЯ И СТРУКТУРА ОДИНАКОВЫ!





## 2.5. МОМЕНТ СИЛЫ

СИЛА, ПОЯВЛЯЮЩАЯСЯ  
В РЕЗУЛЬТАТЕ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ,  
УПРОЩЕННО НАЗЫВАЕТСЯ  
"СИЛОЙ ВРАЩЕНИЯ".



ПОМНИШЬ ФОРМУЛУ ВЫЧИСЛЕНИЯ  
СИЛЫ, КОТОРУЮ В СРЕДНЕЙ  
ШКОЛЕ ПРОХОДЯТ?

ТАМ, ГДЕ "МАССА  
НА УСКОРЕНИЕ"...

НУ, ТАК ВРОДЕ БЫ...

РАССМОТРИМ ЖЕ СИЛУ ВРАЩЕНИЯ!

ЭТА ФОРМУЛА СЛЕДУЕТ  
ИЗ "УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ  
НЬЮТОНА"!

НО ЭТО УРАВНЕНИЕ  
ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПО ПРЯМОЙ.

$$F = ma$$

Сила

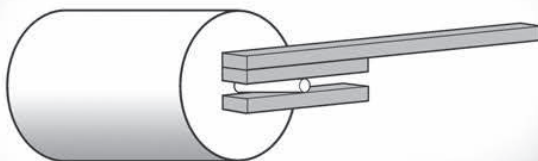
Масса Ускорение

"МОМЕНТ СИЛЫ"...  
ЧТО-ТО НИЧЕГО  
В ГОЛОВУ НЕ ПРИХОДИТ...

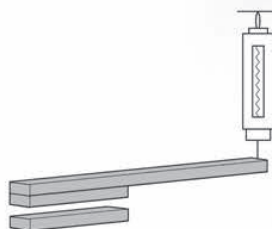
ПО АНАЛОГИИ С СИЛОЙ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ  
ПО ПРЯМОЙ, ДЛЯ СИЛЫ ВРАЩЕНИЯ,  
КОТОРУЮ ЕЩЁ НАЗЫВАЮТ "МОМЕНТОМ СИЛЫ"...

НУ ХОРОШО, РАССКАЖУ  
ПОДРОБНО ПРО СПОСОБ  
ВЫЧИСЛЕНИЯ МОМЕНТА СИЛЫ.

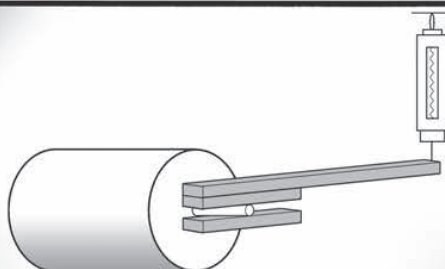
ПРИКРЕПИМ К ВАЛУ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ  
РЫЧАГ,,



...А НА КОНЦЕ РЫЧАГА  
УСТАНОВИМ БЕЗМЕН.



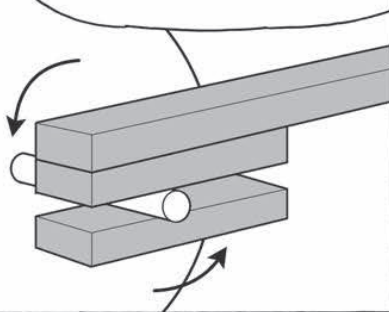
ЕСЛИ МЫ ТЕПЕРЬ  
ЗАПУСТИМ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ,,



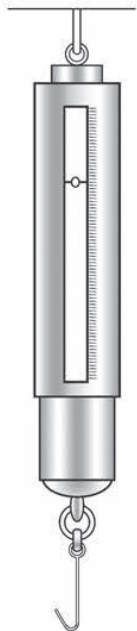
...ТО В СЛУЧАЕ, КОГДА ВАЛ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И РЫЧАГ  
НАДЕЖНО ЗАФИКСИРОВАНЫ,  
НА ВЕСЫ БУДЕТ ВОЗДЕЙСТВОВАТЬ  
ТОЛЬКО СИЛА, ВОЗНИКАЮЩАЯ  
В МОМЕНТ ЗАПУСКА  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.



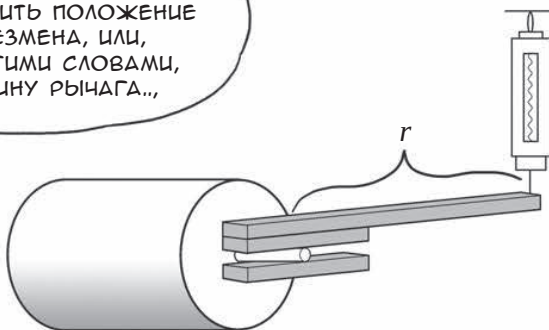
ОДНАКО ЕСЛИ РЫЧАГ  
И ВАЛ СОЕДИНИТЬ СЛАБО,  
ТО ПРИ ВРАЩЕНИИ  
ВОЗНИКНЕТ ТРЕНИЕ,,,



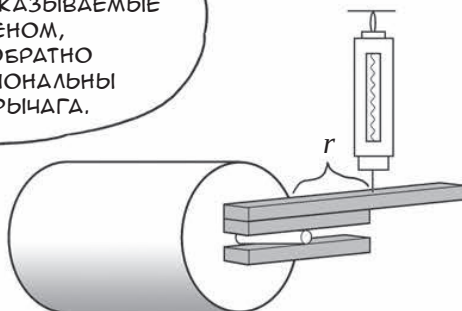
...И БЕЗМЕН БУДЕТ  
ПОКАЗЫВАТЬ СИЛУ,  
ВОЗНИКАЮЩУЮ  
ПРИ ВРАЩЕНИИ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.



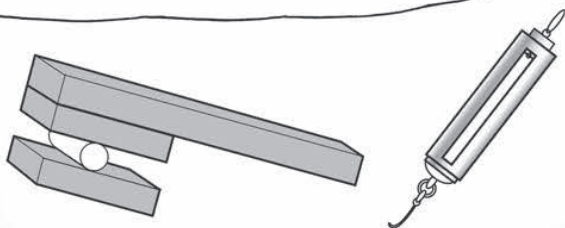
КРОМЕ ТОГО, ЕСЛИ  
ИЗМЕНИТЬ ПОЛОЖЕНИЕ  
БЕЗМЕНА, ИЛИ,  
ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
ДЛИНУ РЫЧАГА...



...ТО ПО  
"ПРИНЦИПУ РЫЧАГА"  
ЗНАЧЕНИЯ, ПОКАЗЫВАЕМЫЕ  
БЕЗМЕНОМ,  
БУДУТ ОБРАТНО  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫ  
ДЛИНЕ РЫЧАГА.



ЕСЛИ ДЛИНУ РЫЧАГА ОБОЗНАЧИТЬ ЗА  $r$ ,  
А ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ,  
КОТОРУЮ ПОКАЗЫВАЕТ БЕЗМЕН, ЗА  $F$ ,  
ТО ЗНАЧЕНИЕ ИХ ПРОИЗВЕДЕНИЯ  $Fr$ ...



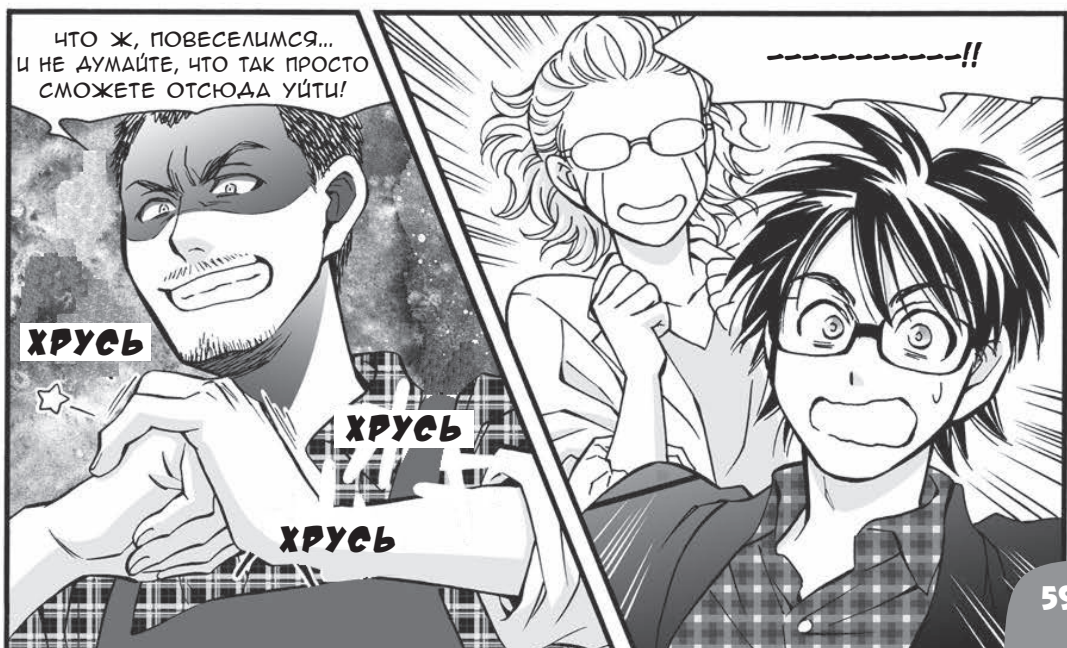
...НЕ БУДЕТ ЗАВИСИТЬ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ  
БЕЗМЕНА, А БУДЕТ ПОСТОЯННЫМ!

ЭТО ЗНАЧЕНИЕ И НАЗЫВАЕТСЯ  
"МОМЕНТОМ СИЛЫ"!



ИТАК, СИЛА ВРАЩЕНИЯ,  
ВОЗНИКАЮЩАЯ, НАПРИМЕР,  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЯХ  
ИЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ГЕНЕРАТОРАХ, ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ  
МОМЕНТОМ СИЛЫ.





## ДОПОЛНЕНИЕ

В электрических двигателях валы начинают вращаться под воздействием тока. Однако для работы электродвигателей нужен не только ток, необходимо также магнитное поле. Для понимания принципов работы электрических двигателей рассмотрим, что же такое электромагнетизм.

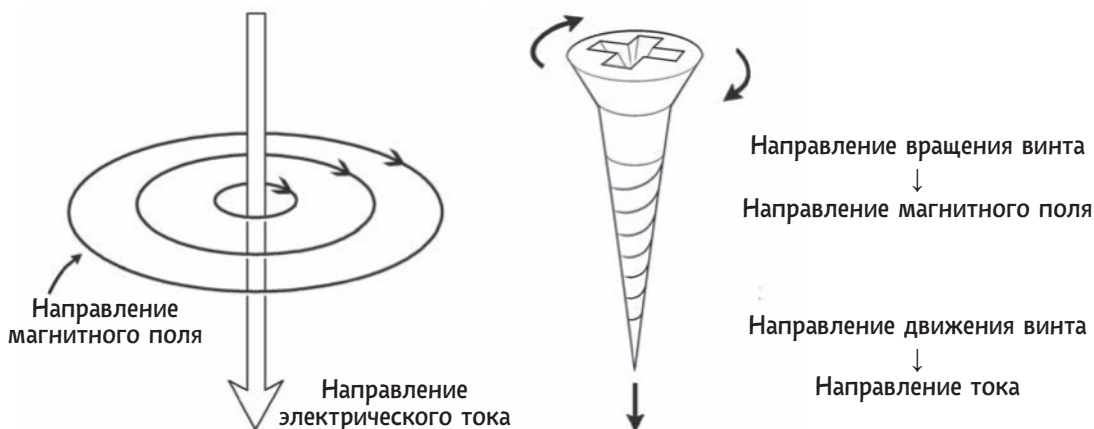


### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Когда течёт электрический ток, вокруг него возникает магнитное поле. Магнитное поле означает, что в пространстве присутствует явление магнетизма. Слово «поле» здесь означает, что влияние может быть оказано на разделенный пространством объект, даже если в пространстве между ничего нет. Так, гравитация Луны и Солнца оказывает влияние на Землю, отделенную от них в космическом пространстве. В этом случае говорят, что «Земля находится в гравитационном поле Солнца и Луны». В физике многие подобные явления называют, используя слово «поле». Так и вокруг постоянных магнитов возникает магнитное поле. Мы считаем, что в магнитном поле силовые линии идут по направлению от полюса  $N$  к полюсу  $S$ , подобно тому, как это было показано на стр. 45. И хотя в пространстве вокруг магнита ничего нет, но благодаря магнитному полю, создаваемому магнитом, это пространство подвергается воздействию магнетизма.

Итак, идёт электрический ток, и вокруг него возникает магнитное поле. Это изображено на рис. 2.1. Магнитное поле в этом случае распространяется в виде концентрических кругов. Напряжённость магнитного поля обозначается  $H$ , и она обратно пропорциональна расстоянию  $r$  от тока  $I$ :

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$



**Рисунок 2.1. Магнитное поле, возникающее при прохождении электрического тока**

Кроме того, мы говорили о том, что направление магнитного поля определяется направлением вращения винта. Речь идёт о следующем правиле: «если направление поступательного движения винта совпадает с направлением движения тока, то направление вращения винта совпадает с направлением движения линий магнитного поля». То есть, хотя при поступлении электрического тока получается электрическая энергия, тот факт, что при этом возникает магнитное поле, говорит о том, что электрическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля.

А что же будет происходить, если ток по проводу будет идти не по прямой, а по виткам катушки? Такая ситуация изображена на рис. 2.2, подобная цилиндрическая обмотка из провода называется соленоидом. Когда ток идёт по такому соленоиду, на каждом участке образуются магнитные поля с направлением движения силовых линий, определяемых по правилу вращения винта. Если же все их объединить, то получится магнитное поле, изображённое на рисунке. Если ток течёт так, как показано на рисунке, то силовые линии магнитного поля будут выходить справа от катушки и возвращаться влево. В этом случае внешнее магнитное поле будет таким же, как магнитное поле, образованное цилиндрическим постоянным магнитом с полюсом *N* с правой стороны. Другими словами, соленоид при прохождении через него электрического тока создаёт магнитное поле подобно постоянному магниту вытянутой формы. Это называется электромагнитом. То есть магнитом, созданным электричеством. И в электрических двигателях используются не только постоянные магниты, но и магнитные поля, порождённые электричеством.



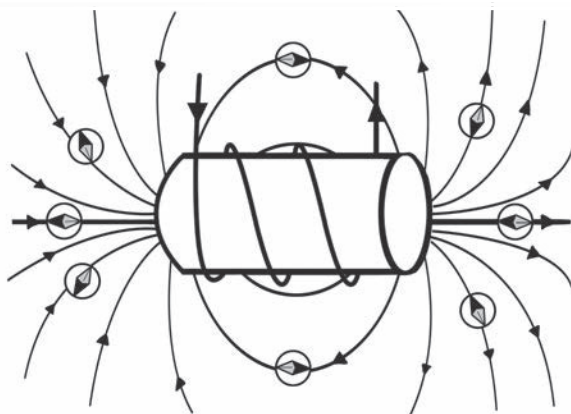


Рисунок 2.2. Магнитное поле, возникающее при прохождении электрического тока по катушке



## ПОЧЕМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ВРАЩАЮТСЯ

Полюса *N* и *S* в магнитах взаимно притягиваются. Это действует так называемая «сила магнитного притяжения». А между одноимёнными полюсами возникает «сила магнитного отталкивания». Это говорит о том, что при помещении магнита в магнитное поле возникают механические силы.

А теперь в магнитное поле поместим проводник (электрический провод) и пустим по нему ток. Тогда в проводнике, который благодаря электрическому току стал подобен магниту, под воздействием внешнего магнитного поля возникнет механическая сила. Именно эта сила, возникающая между магнитным полем и электрическим током, и используется для вращения валов электрических двигателей.

Чтобы разобраться в принципах работы электрического двигателя, нужно хорошо знать четыре силы, возникающие при взаимодействии электричества и магнитного поля. Две из них относятся к электродвижущим силам<sup>2</sup>, а две другие – к электромагнитным силам.

## ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ТРАНСФОРМАТОРА

Когда между катушкой (проводником) и магнитным потоком<sup>3</sup> возникает взаимодействие, подобно звеньям цепи, как показано на рис. 2.3, то говорят, что катушка взаимосвязана с магнитным потоком. А когда катушка взаимосвязана с магнитным потоком, то при изменении величины магнитного потока возникает электродвижущая сила. То есть если магнитное поле увеличивается или уменьшается, в катушке появляется сила, перемещающая электрические заряды. Это явление называется электромагнитной индукцией.

<sup>2</sup> Электродвижущие силы – это силы, благодаря которым возникает электричество.

<sup>3</sup> Магнитный поток – это выражающий силу магнитного поля и его направление пучок силовых линий магнитного поля.

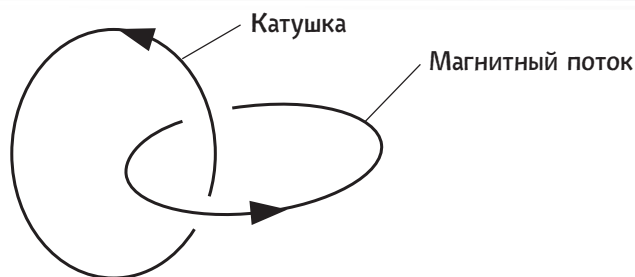


Рисунок 2.3. Взаимосвязь катушки и магнитного поля

Электродвижущая сила (ЭДС), возникшая в результате электромагнитной индукции, называется ЭДС индукции. Величина ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Эта взаимосвязь называется «закон Фарадея». Если магнитный поток  $\psi$  [Вб], взаимосвязанный с катушкой, изменился за промежуток времени  $t$  [с], то возникшую при этом вследствие электромагнитной индукции ЭДС индукции  $e$  [В] можно вычислить по формуле

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \text{ [В]}.$$

Эта формула с помощью дифференцирования выражает отношение изменения магнитного потока с течением времени к изменению самого времени. В числителе дроби находится показатель изменения магнитного потока, а в знаменателе – требуемое для этого изменения время. Кроме того, мы видим знак минус в формуле для вычисления ЭДС индукции. Это показывает, что ЭДС индукции создает электрический поток, направленный против изменения магнитного потока.

Катушка сделана из проводника, например из меди. Когда к проводнику приложена электродвижущая сила, то внутри проводника возникает электрический ток. А теперь представим, что проводником выступает не катушка или медный провод, а металлическая панель. В этом случае электрический ток в панели начинает идти кругами (рис. 2.4). Место прохождения электрического тока не фиксировано. Такой ток называется вихревым током.

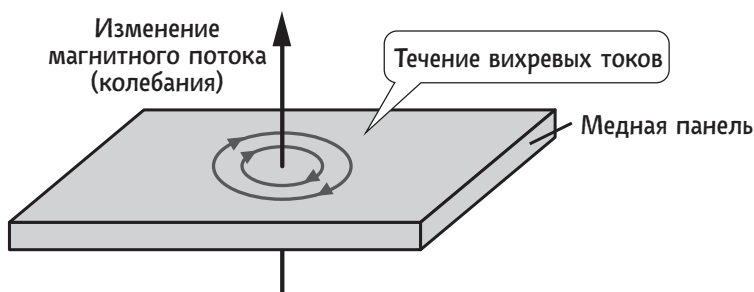


Рисунок 2.4. Вихревые токи

Для переменного тока изначально величина и направление меняются. Поэтому и полученный из такого тока магнитный поток тоже будет менять величину и направление. Следовательно, при переменном токе вследствие электромагнитной индукции непременно возникнет электродвижущая сила. Трансформаторы же, используя такую ЭДС индукции, возникающую благодаря переменному току, изменяют напряжение и силу тока переменного тока. В этом случае такая ЭДС индукции называется электродвижущей силой трансформатора.

## ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрим ещё одну электродвижущую силу. Когда проводник движется в магнитном поле, в проводнике возникает электродвижущая сила. Здесь введём понятие магнитной индукции. Магнитная индукция показывает величину магнитного потока  $[Вб]$  на  $1\text{ м}^2$ . Единица измерения – тесла  $[Тл]$ . Когда проводник длиной  $\ell$   $[м]$  движется в магнитном поле с магнитной индукцией  $B$   $[Тл]$  со скоростью  $v$   $[м/с]$  перпендикулярно магнитному потоку, то в проводнике возникает электродвижущая сила. В этом случае величину ЭДС  $e$   $[В]$  можно вычислить по формуле

$$e = B \cdot \ell \cdot v \text{ [В]}.$$

То есть величина ЭДС индукции  $e$  пропорциональна скорости  $v$  движения проводника. В этом случае направление ЭДС определяется, как было показано на стр. 54, по правилу правой руки Флеминга. Если большой, указательный и средний пальцы правой руки раскрыть под прямыми углами друг к другу и большой палец направить соответственно движению проводника, а указательный палец направить в соответствии с силовыми линиями магнитного поля, тогда средний палец будет показывать направление действия электродвижущей силы индукции.

Такая ЭДС, возникающая по причине движения проводника, и величина которой пропорциональна скорости движения проводника, называется электродвижущей силой при движении проводника в магнитном поле.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА

Если по проводнику, находящемуся в магнитном поле, течёт ток, то в проводнике возникает электромагнитная сила. Электромагнитную силу  $F$  можно вычислить по следующей формуле, где  $B$  [Тл] – это магнитная индукция, а  $I$  [А] – это сила тока:

$$F = B \cdot I \cdot \ell \text{ [Н]}.$$

В этом случае направление электромагнитной силы определяется, как было показано на стр. 50, по правилу левой руки Флеминга. Если большой, указательный и средний пальцы левой руки раскрыть под прямыми углами друг к другу и средний палец направить соответственно движению тока, а указательный палец направить в соответствии с силовыми линиями магнитного поля, тогда большой палец будет показывать направление действия возникшей силы. Эта сила появляется благодаря взаимодействию электрического тока и магнитного потока, поэтому она и называется электромагнитной силой.

## ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ МАКСВЕЛЛА

Есть и другая сила, возникающая по причине отклонения (распределения) магнитного потока. Она называется тензор напряжений Максвелла. Предположим, что силовые линии магнитного поля направлены сверху вниз, как это показано на рис. 2.5а. Кроме того, вокруг электрического тока тоже возникает магнитное поле, которое будет представлено в виде concentric circles, с направлением силовых линий, определяемых по правилу винта. Взаимодействие двух магнитных полей приведёт к тому, что слева от линии тока магнитные поля будут действовать в разных направлениях и взаимно нивелироваться, а справа магнитные поля будут действовать в одном направлении и взаимно усиливаться. И следовательно, магнитное поле будет как бы уплотняться и отклоняться вправо, как показано на рис. 2.5б. Силовые линии магнитного поля ведут себя подобно натянутой резинке. Другими словами, в таком положении возникает сила, направленная на то, чтобы вернуть силовые линии магнитного поля в исходное положение. Эта сила и называется тензором напряжений Максвелла. Поэтому в подобной ситуации в проводнике возникает сила, направленная влево.

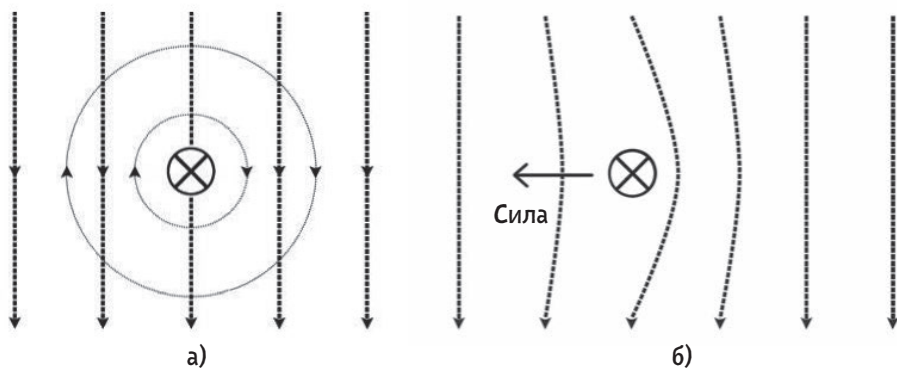


Рисунок 2.5. Тензор напряжений Максвелла

В электрических двигателях катушка (проводник) располагается внутри сердечника (сделанного из магнитных материалов, например железа), канала для магнитного потока. Из-за тензора напряжений Максвелла внутри сердечника возникает сила. Но в то же время железо вступает во взаимодействие с магнитным полем в более чем 5000 раз легче, чем воздух, и поэтому магнитный поток почти полностью проходит через железо<sup>4</sup>. Вследствие этого в проводнике практически не возникает сил. В этом случае такая сила называется моментом силы сердечника. В современных двигателях часто делают такую сложную конструкцию сердечника, чтобы достичь максимального момента силы сердечника. Умелое использование момента силы сердечника ведёт к повышению эффективности электрических двигателей.



## ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛЫ

Работа электрического двигателя заключается с тем, чтобы вращать механизм, подсоединённый к валу двигателя. То есть электродвигатель совершает вращательные движения. В данном случае действует вращающая сила. Она называется момент силы. Действие момента силы показано на стр. 58.

На рисунках на стр. 58 использовался безмен, и, возможно, у вас создалось впечатление, что измерить момент силы легко. Однако если меняются длина рычага и положение безмена, то меняются и показания безмена. И получается, что длина рычага и показания безмена обратно пропорциональны. Однако произведение  $Fr$  длины рычага  $r$  [м] на показания безмена  $F$  [кг] будет равно постоянному числу. Это произведение длины и силы и выражает момент силы. Из этого следует, что единицей измерения момента силы являются килограммы на метры [кг·м]. Эта единица измерения относится к системе МКГСС (метр-килограмм-сила-секунда). Однако сейчас общераспространённой является Международная система единиц (СИ), по этой системе единицей измерения момента силы является ньютон-метр [Н·м].

Момент силы в 1 Н·м означает, что на рычаг длиной  $r = 1$  м воздействует сила, равная 1 Н. Момент силы же в 1 кг·м означает, что на рычаг длиной  $r = 1$  м воздействует сила, равная 1 кг. Если же переводить из одной системы в другую, получим

$$1 \text{ кг} \cdot \text{м} = 9,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Однако даже если в наличии нет рычага, можно вычислить момент силы, не измеряя его непосредственно. Для этого достаточно знать мощность электродвигателя и количество оборотов.

<sup>4</sup> Степень проходимости магнитного поля через конкретную среду определяется величиной магнитной проницаемости  $\mu$ .

Теперь предположим, что при моменте силы  $T$  [Н·м] вал сделал один оборот. В этом случае при длине рычага в 1 м получается, что под действием силы  $F$  [Н] пройден путь, равный длине окружности с радиусом 1 м, то есть равный  $2\pi \times 1$  м.

То есть при совершении одного оборота проделана работа, равная  $2\pi \times T$  [Дж]. Работа равна «сила  $\times$  расстояние», аналогично как при движении по прямой.

Теперь предположим, что электрический двигатель совершает  $n$  оборотов в минуту, то есть  $n$  [мин<sup>-1</sup>]<sup>5</sup> оборотов или  $n/60$  оборотов в 1 с.

Тогда расстояние, пройденное за 1 с, будет равно  $(n/60) \times 2\pi$  м.

Работа, выполняемая за 1 с, называется мощностью [Дж/с]. Мощность измеряется в ваттах [Вт]. Количество работы, или мощность  $P_0$  [Вт], вычисляется по следующей формуле:

$$P_o = \frac{2\pi}{60} \cdot T \cdot n \text{ [Дж/с]} = 0.1047 T \cdot n \text{ [Вт]}.$$

Следовательно, зная мощность электрического двигателя  $P_0$  [Вт] и количество оборотов  $n$  [об/мин], можно найти момент силы электродвигателя по следующей формуле:

$$T = \frac{P_o}{0.1047n} \text{ [Н·м]}.$$

Количество оборотов электродвигателя в Международной системе единиц выражается через угловую частоту  $\omega$  [рад/с]. В этом случае без преобразования единиц измерения можно записать следующим образом:

$$P_o = T \cdot \omega \text{ [Вт]} = \text{[Н·м]}[\text{рад/с}].$$

<sup>5</sup> [мин<sup>-1</sup>] – единица измерения частоты вращения, означает количество оборотов в минуту, раньше единицей измерения служили [rpm] (revolutions per minute).





# Глава 3

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 3.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРО- МОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА







ТО ЛИ ПОТОМУ, ЧТО  
НАША ТОРГОВАЯ УЛИЦА  
СТАЛА ТАКОЙ СТАРОЙ...  
ПОКУПАТЕЛЕЙ ТЕПЕРЬ  
ТАК МАЛО!



И ВОТ В ТАКОЕ-ТО ВРЕМЯ К ВАМ  
ВАРУГ ТАКОЕ ОСОБОЕ ОТНОШЕНИЕ...  
ПРОСТИТЕ! ИЗВИНИТЕ!



ЭЙ, ВЫ...  
ЕСЛИ СОЧУВСТВУЕТЕ  
МОЕЙ ДОЧЕРИ,  
ТАК КУПИТЕ  
ЧТО-НИБУДЬ!



НО, НО Я ЖЕ ТОЖЕ С ЭТОЙ УЛИЦЫ.



СЮ! У ТЕБЯ ТОЖЕ ЕСТЬ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬ! ЕСЛИ МЫ  
БУДЕМ ПОКУПАТЬ ДРУГ У ДРУГА,  
ТО ЭТИМ БУДЕМ ПОДДЕРЖИВАТЬ  
ДЕЛА ДРУГ ДРУГА!

ЭТО... А Я КАК РАЗ ИЗНАЧАЛЬНО  
И ПРИШЁЛ, ЧТОБЫ КУПИТЬ  
КОЕ-ЧТО ИЗ БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ.



ЧТО? ВОТ КАК!



ТОГДА...  
Я САМ ТЕБЯ  
ОБСЛУЖУ!

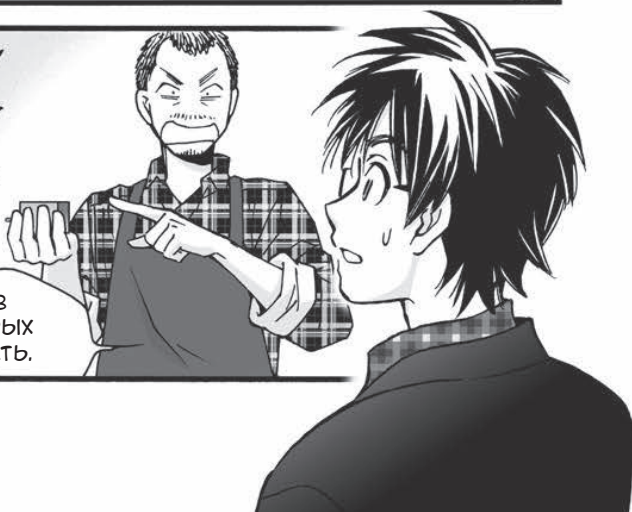


СМОТРИ, ВОТ ЭТОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА...  
РАБОТАЕТ ОТ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО  
ТОКА, НАПРИМЕР ОТ БАТАРЕЕК!

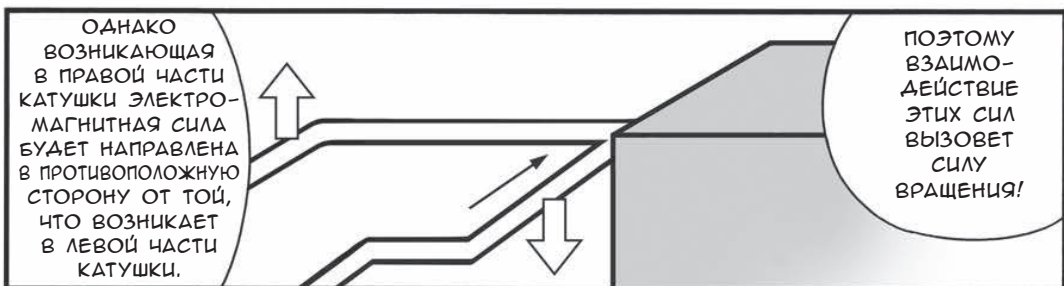
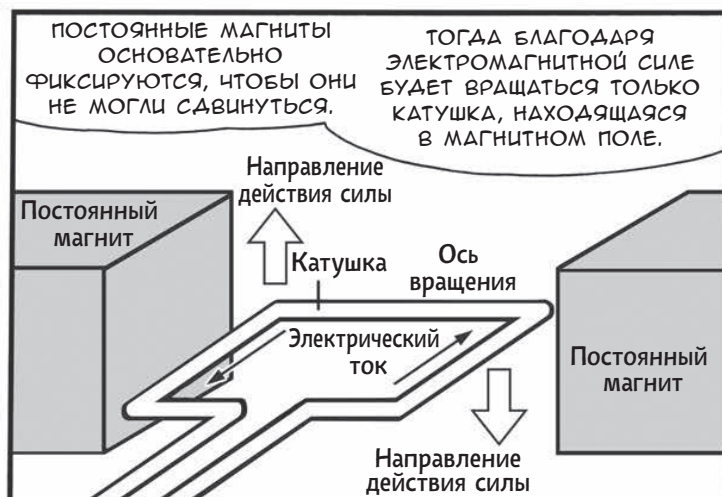
В МИРЕ ЭТОТ ТИП  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ЧАЩЕ ВСЕГО!

А... АА...

ЭТО ЖЕ ОДИН ИЗ ТЕХ ТИПОВ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, О КОТОРЫХ  
КОПРУ СОБИРАЛАСЬ РАССКАЗАТЬ.

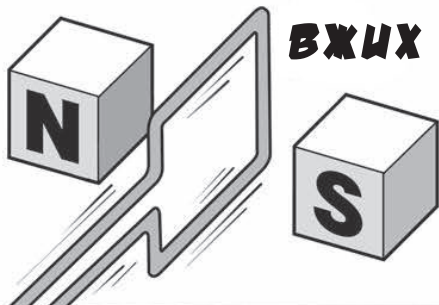




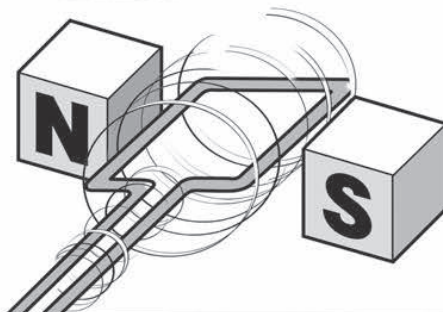




НО В ЭТОМ СЛУЧАЕ КАТУШКА ПРОСТО  
ОДИН РАЗ ПОВЕРНЁТСЯ И ЗАМРЁТ  
ВДОЛЬ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ПОЛЮСАМИ  
МАГНИТОВ N И S.



ОДНАКО ЕСЛИ В МОМЕНТ ПОПАДАНИЯ  
КАТУШКИ В ЭТУ ПОЗИЦИЮ ПОМЕНЯТЬ  
В ЭЛЕКТРОСЕТИ ПОЛЯРНOSTЬ (ПОМЕНЯТЬ  
ПЛЮС И МИНУС МЕСТАМИ), ТО...



...КАТУШКА БУДЕТ  
ПОСТОЯННО ВРАЩАТЬСЯ  
В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ.

ЭТО  
ПРИНЦИП РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
МОТОРОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА!



ХММ... НО...

КАК ЖЕ ЭТО ВОЗМОЖНО, ТАК ЧАСТО  
МЕНЯТЬ НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА?



АГА, ОТЛИЧНЫЙ ВОПРОС.

ЗДЕСЬ ВСТУПАЮТ В ДЕЛО  
"ЩЁТКИ" И "КОЛЛЕКТОР"!



## 3.2. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРО-МОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА



“ЩЁТКИ” И  
“КОЛЛЕКТОР” - ...

ЭТО ТАКИЕ ЧАСТИ  
ЭЛЕКТРОМОТОРА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА,  
РАСПОЛОЖЕННЫЕ  
ВОТ ТУТ.

ЩЁТКИ УСТАНОВЛЕНЫ  
НА СТАТОРЕ, И ПОЭТОМУ  
ОНИ НЕ ВРАЩАЮТСЯ.

А КОЛЛЕКТОР  
СОЕДИНЁН С КАТУШКОЙ,  
УСТАНОВЛЕННОЙ  
НА РОТЕРЕ (ВАЛЕ).

Постоянный магнит

Катушка

Щётки

Коллектор

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НАХОДИТСЯ  
ВНЕ ЭЛЕКТРОМОТОРА,

Постоянный магнит

Направление силы

Катушка

Коллектор

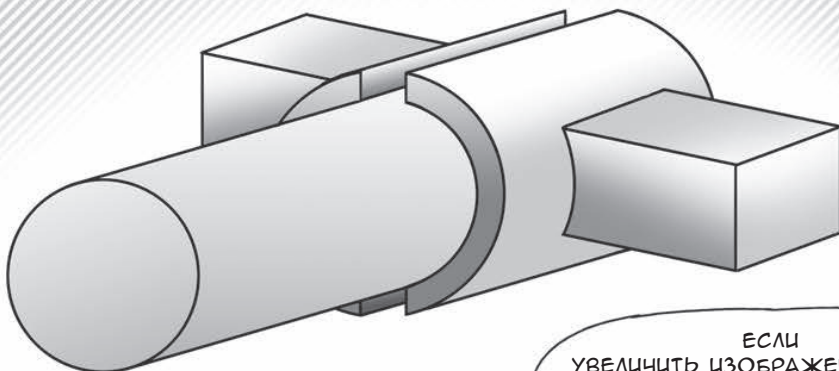
Направление  
силы

Щётки

Проходит  
электрический ток

А ЩЁТКИ МОТОРА  
ПРИСОЕДИНЯЮТСЯ  
ПО ОТДЕЛЬНОСТИ  
К ПЛЮСОВОМУ  
И МИНУСОВОМУ  
КОНТАКТАМ СЕТИ.

Постоянный магнит



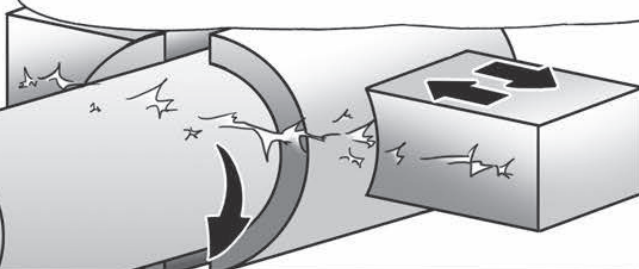
ЕСЛИ  
УВЕЛИЧИТЬ ИЗОБРАЖЕНИЕ ЩЁТОК  
И КОЛЛЕКТОРА, КОНСТРУКЦИЯ  
БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ ТАК.

ЩЁТКИ НАХОДЯТСЯ  
В ПОСТОЯННОМ КОНТАКТЕ  
С ВРАЩАЮЩИМСЯ КОЛЛЕКТОРОМ, ...  
...ПОЭТОМУ ОТ ЩЁТОК  
В КОЛЛЕКТОР ПОСТУПАЕТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.



ТАКИМ ОБРАЗОМ, КОЛЛЕКТОР,  
ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВМЕСТЕ  
С КАТУШКОЙ, БУДЕТ ПЕРЕДАВАТЬ  
КАТУШКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК  
С ПЕРЕМЕННЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ...

...В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ КОНТАКТОВ НА ЩЁТКАХ!





В КОЛЛЕКТОРЕ  
ЕСТЬ ТАКОЙ ЗАЗОР,  
ВИДИШЬ?

ОН СДЕЛАН,  
ЧТОБЫ ОБЕСПЕЧИТЬ  
ИЗОЛЯЦИЮ.

БЛАГОДАРЯ ЭТОМУ,  
КОГДА КАТУШКА ПОПАДАЕТ  
В ПОЛОЖЕНИЕ МЕЖДУ ПОЛЮСАМИ  
N И S, МЕНЯЕТСЯ ПОЛЯРНОСТЬ ТОКА.

И ТАКИМ ОБРАЗОМ  
НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА В КАТУШКЕ  
ОСТАЕТСЯ ПОСТОЯННЫМ!

НА САМОМ ДЕЛЕ  
В РЕАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРО-  
МОТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
ТРИ И БОЛЕЕ КАТУШЕК,  
И КОЛЛЕКТОР ДЕЛИТСЯ  
СООТВЕТСТВЕННО  
НА ТРИ И БОЛЕЕ ЧАСТЕЙ  
(КОНТАКТНЫХ ПЛАСТИН).

НА ЭТОМ РИСУНКЕ  
ПОКАЗАНО  
НАПРАВЛЕНИЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
ДЛЯ СЛУЧАЯ, КОГДА  
В ЭЛЕКТРОМОТОРЕ  
КАТУШЕК И  
КОНТАКТНЫХ ПЛАСТИН  
КОЛЛЕКТОРА  
ПО 4 ШТУК.

Постоянный магнит  
(индуктор)

Якорь (обмотка)

Щётки

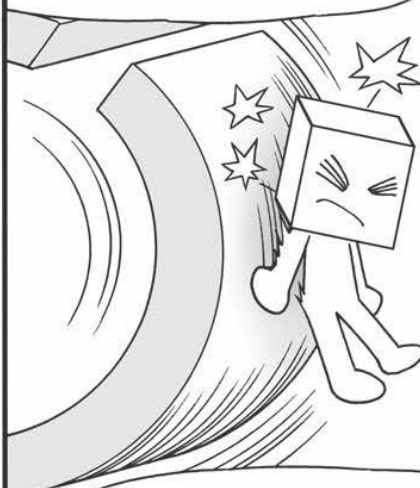
Коллектор

ЩЁТКИ НЕОБХОДИМЫ ДЛЯ  
ИЗМЕНЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ТОКА  
В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА.

НО ИЗ-ЗА ТОГО, ЧТО ОНИ  
КОНТАКТИРУЮТ С КОЛЛЕКТОРОМ  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА...

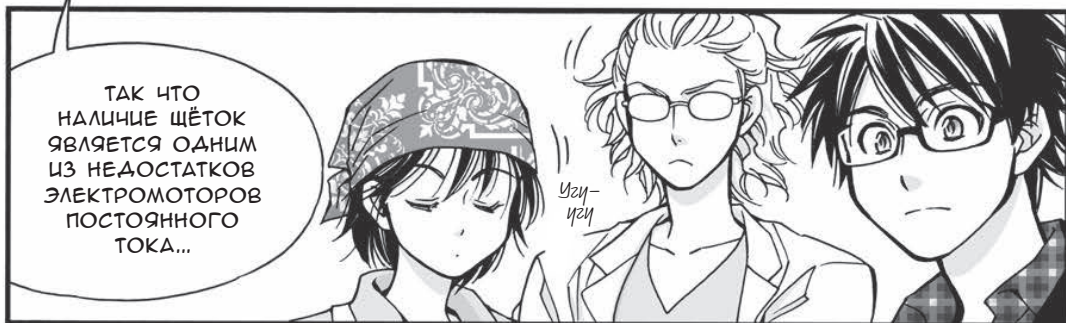


...БЫВАЕТ, ЧТО  
ВОЗНИКАЮТ ИСКРЫ.

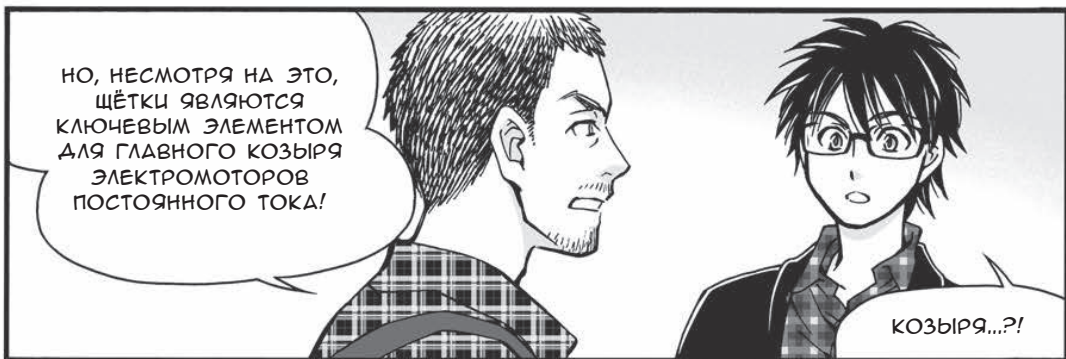


ТАКИМ ОБРАЗОМ,  
ЩЁТКИ ИЗНАШИВАЮТСЯ  
И ВЫХОДЯТ ИЗ СТРОЯ.

ТАК ЧТО  
НАЛИЧИЕ ЩЁТОК  
ЯВЛЯЕТСЯ ОДНИМ  
ИЗ НЕДОСТАТКОВ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОВ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА...



НО, НЕСМОТРЯ НА ЭТО,  
ЩЁТКИ ЯВЛЯЮТСЯ  
КЛЮЧЕВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ  
ДЛЯ ГЛАВНОГО КОЗЫРЯ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА!



КОЗЫРЯ...?!



### 3.3. УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЕМ В МОТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЛАВНЫМ КОЗЫРЕМ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОТОРОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ЯВЛЯЕТСЯ ТО...

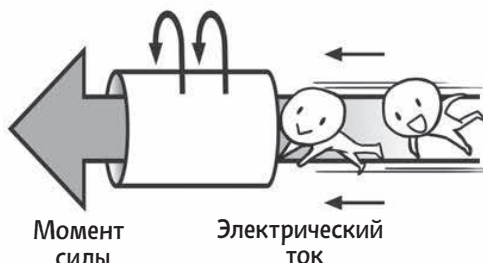
...ЧТО В НИХ МОЖНО  
ЛЕГКО МЕНЯТЬ  
ЧИСЛО ОБОРОТОВ!

ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
РЕГУЛИРУЯ ЧИСЛО ОБОРОТОВ  
В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА,  
МОЖНО УПРАВЛЯТЬ  
РАБОТАЮЩИМИ ОТ ЭТИХ  
МОТОРОВ МЕХАНИЗМАМИ!

КОУРУ, А ТЫ ЕМУ  
ПРО МОМЕНТ СИЛЫ  
РАССКАЗАЛА?

Ага!

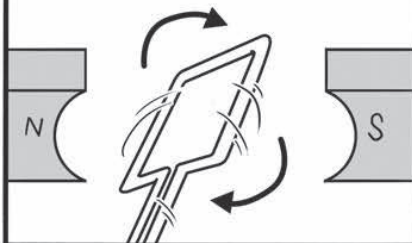
В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА МОМЕНТ СИЛЫ  
ПРОПОРЦИОНАЛЕН ПОСТУПАЮЩЕМУ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ!



ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ЕСЛИ  
УВЕЛИЧИТЬ СИЛУ ТОКА В ДВА РАЗА,  
ТО И ЗНАЧЕНИЕ ВОЗНИКАЮЩЕГО  
МОМЕНТА СИЛЫ БУДЕТ БОЛЬШЕ  
В ДВА РАЗА.



КОГДА МЫ ГОВОРим,  
ЧТО ЭЛЕКТРОМОТОР  
ПОСТОЯННОГО ТОКА ВРАЩАЕТСЯ,  
МЫ ПОДРАЗУМЕВАЕМ, ЧТО В НЁМ  
ВРАЩАЕТСЯ КАТУШКА.



ИЗ-ЗА ВРАЩЕНИЯ КАТУШКИ В МАГНИТНОМ  
ПОЛЕ, СОЗДАВАЕМОМ ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ В СТАТОРЕ...



...ВОЗНИКАЕТ ТАК НАЗЫВАЕМАЯ  
"ЭЛЕКТРОВИДУЩАЯ СИЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ  
ПРОВОДНИКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ".

В ТО ЖЕ ВРЕМЯ ВНУТРИ  
ЭЛЕКТРОВИДУТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО  
ТОКА ПРИ ВРАЩЕНИИ ВОЗНИКАЕТ  
И ДРУГАЯ ЭЛЕКТРОВИДУЩАЯ СИЛА,  
А ТАКЖЕ ВЫРАБАТЫВАЕТСЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.



ИНАДУЦИРОВАННАЯ ВРАЩЕНИЕМ  
ЭЛЕКТРОВИДУЩАЯ СИЛА  
НАЗЫВАЕТСЯ "ЭДС ИНАДУКЦИИ" И  
ОБОЗНАЧАЕТСЯ ЧЕРЕЗ  $E$ .



$E$

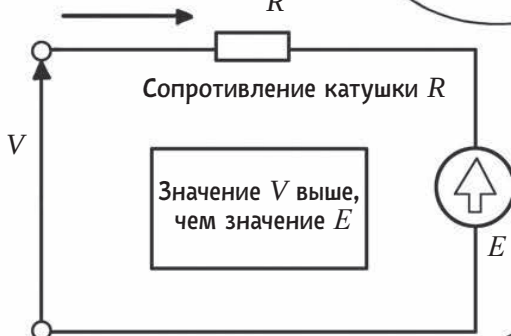
И ОНА ПРОПОРЦИОНАЛЬНА  
КОЛИЧЕСТВУ ОБОРОТОВ.

НА ЭТОЙ СХЕМЕ  
ПОКАЗАНО  
ВЗАИМООТНОШЕНИЕ  
МЕЖДУ  
ИСПОЛЗУЕМОЙ  
ЭЛЕКТРОВИДУТЕЛЕМ  
СИЛОЙ ТОКА  $I$  И  
НАПРЯЖЕНИЕМ  $V$ ,  
ПОСТУПАЮЩИМ  
ИЗВНЕ НА КОНТАКТЫ  
ЭЛЕКТРОВИДУТЕЛЯ.

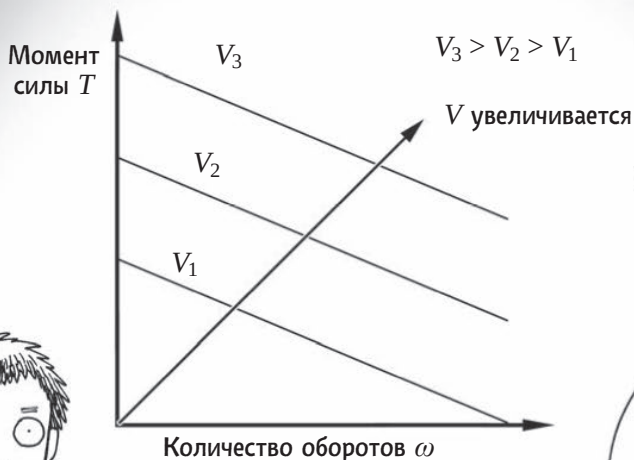
Поступающее извне напряжение  $V$

$$\text{Сила тока } I = \frac{V - E}{R}$$

$R$  - ЭТО  
СОПРОТИВЛЕНИЕ  
КАТУШКИ!



В КАТУШКЕ  
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
ТОЛЬКО РАЗНИЦА  
МЕЖДУ  
НАПРЯЖЕНИЕМ  
НА КОНТАКТАХ  
ЭЛЕКТРОМОТРА И  
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ  
СИЛОЙ ПИТАУЩИХ.

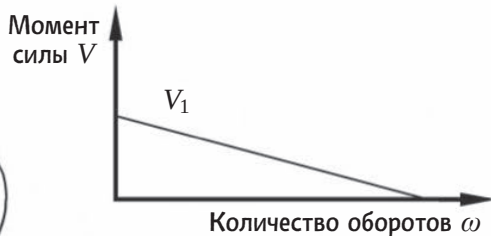


КОЦУ!

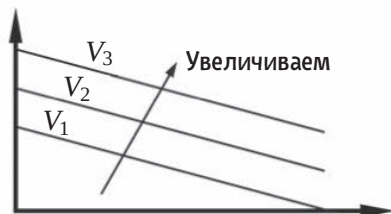
ЕСЛИ ИЗОБРАЗИТЬ  
СООТНОШЕНИЕ  
КОЛИЧЕСТВА ОБОРОТОВ  
И МОМЕНТА СИЛЫ  
НА ГРАФИКЕ,  
ТО ОН БУДЕТ  
ВЫГЛЯДЕТЬ ТАК!

ЗДЕСЬ  $T$  -  
ЭТО ЗНАЧЕНИЕ  
МОМЕНТА СИЛЫ,  
А  $\omega$  -  
КОЛИЧЕСТВО  
ОБОРОТОВ.

ЕСЛИ ПОСТУПАЮЩЕЕ ИЗВНЕ НА КОНТАКТЫ ЭЛЕКТРОМОТОРА НАПРЯЖЕНИЕ ЗАФИКСИРОВАТЬ, ТО СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МОМЕНТОМ СИЛЫ И КОЛИЧЕСТВОМ ОБОРОТОВ БУДЕТ ВЫРАЖЕНО ПРЯМОЙ НАКЛОННОЙ ЛИНИЕЙ.



ЕСЛИ ЖЕ ПОВЫСИТЬ НАПРЯЖЕНИЕ, ТО ЭТА ПРЯМАЯ ПЕРЕМЕСТИТСЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО ВВЕРХ.



ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ВСЕГО ЛИШЬ ПОВЫШАЯ НАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА, МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ КОЛИЧЕСТВО ОБОРОТОВ И МОМЕНТ СИЛЫ!

ТО ЕСТЬ, РЕГУЛИРУЯ НАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА, МОЖНО УПРАВЛЯТЬ МОМЕНТОМ СИЛЫ И КОЛИЧЕСТВОМ ОБОРОТОВ!



НУ, КОИРУ, ЧЕГО Ж ТЫ МЕНЯ ПЕРЕБИЛА, А?..



ПРОСТИ, Я ВРАГУГ ЗАХОТЕЛА СКАЗАТЬ И НЕ УДЕРЖАЛАСЬ.







# ДОПОЛНЕНИЕ



## ПОЧЕМУ ВРАЩАЮТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА?

Составляющие электрического мотора можно подразделить в зависимости от выполняемой ими роли на ротор и статор. Как можно понять из их названий, ротор – это вращающаяся часть, а статор – неподвижная часть электромотора. Ротор электромоторов постоянного тока называют ещё официально якорем, а статор называют также индуктором. На рис. 3.1 индуктор – это создающие магнитный поток постоянные магниты по краям рисунка. Задача индуктора – создавать магнитное поле. В средней части рисунка изображена катушка – это и есть якорь. Его задача – преобразовывать электрическую энергию в энергию вращения.

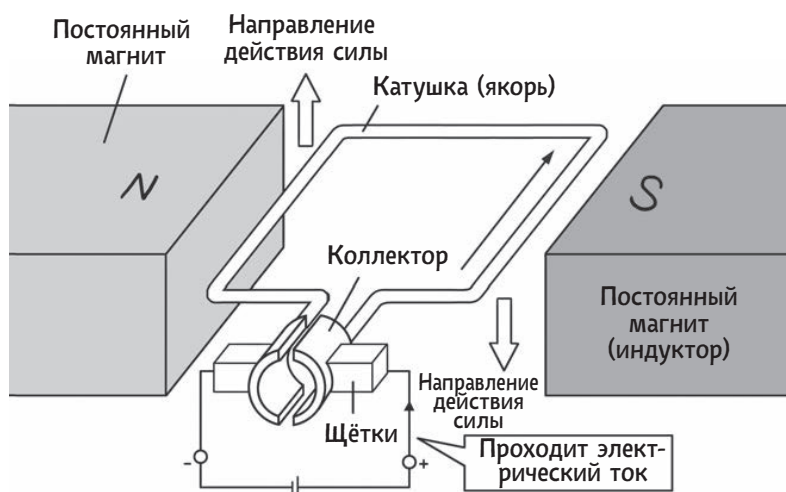


Рисунок 3.1. Принцип работы электромотора постоянного тока

Принцип работы электромотора постоянного тока можно объяснить, используя правило Флеминга. При попадании якоря (катушки), по которому проходит ток, в созданное индуктором магнитное поле появляется сила, которая будет действовать в направлении, определяемом правилом левой руки Флеминга. На рисунке видно, что возникшие в левой и правой частях катушки силы будут действовать в разных направлениях. Другими словами, возникнет сила вращения.

На рис. 3.1 изображены также коллектор и щётки. Благодаря их работе можно менять направление электрического тока в катушке. Коллектор и щётки изображены в большем масштабе на стр. 76. Хотя коллектор и щётки соприкасаются, щётки установлены на статоре и не вращаются.

Две щётки, каждая по отдельности, соединены с плюсовым и минусовым контактами источника постоянного тока. Коллектор же расположен на роторе и поэтому вращается. И так как коллектор соединен с катушкой, то через него в катушку поступает электричество от щёток. Когда катушка вращается, положение коллектора, касающегося щёток, меняется. Другими словами, при вращении катушка соединяется то с «плюсовой» щёткой, то с «минусовой», вследствие чего направление тока в катушке меняется. По этой причине в каждом конкретном положении вращающейся катушки направление электрического тока всё время будет одинаковым. Другими словами, в каком бы положении не находилась катушка, направление возникающих сил всегда будет таким, как на рис. 3.1.

На рис. 3.1 рассмотрен пример с одной катушкой. На самом же деле в электромоторах постоянного тока используется три и более катушек. Коллектор же состоит из контактных пластин, количество которых равно количеству катушек. На рис. 3.2 показано устройство электромотора с 9 катушками и коллектором с 9 контактными пластинами. О работе щёток и коллектора более подробно будет рассказано в главе 4, где речь пойдёт об электромоторах без щёток.

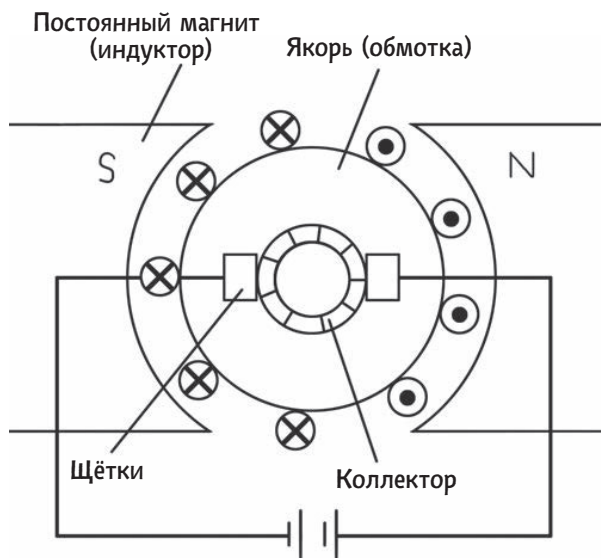


Рисунок 3.2. Коллектор и щётки на примере реального электромотора

Во время работы электромотора щётки и коллектор находятся в постоянном контакте, вследствие чего со временем они изнашиваются. Кроме того, так как полярность электрического тока постоянно меняется, то могут появляться искры. А это значит, что может повреждаться поверхность компонентов. Поэтому чаще всего для изготовления щёток используют сравнительно мягкие материалы, чтобы изнашивались щётки, а не коллектор. Так как щётки установлены на статоре, их замена довольно проста. Большинство электрических моторов постоянного тока требует периодической замены щёток.





## КОНСТАНТА МОМЕНТА СИЛЫ И КОНСТАНТА ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Принцип работы электромотора постоянного тока объясняется с помощью правила левой руки Флеминга. Если это правило выразить формулой, то получим выражение для нахождения электромагнитной силы. Пусть  $B$  [Тл] – это магнитная индукция, а  $I$  [А] – это сила тока. Тогда возникающую в катушке электромагнитную силу  $F$  [Н] можно выразить как

$$F = B \cdot I \cdot l.$$

Рассмотрим величины, используемые в уравнении. Магнитная индукция  $B$  будет постоянной, так как в электромоторе используются постоянные магниты. Длина проводника  $l$  определяется формой электрического мотора. Таким образом, эти два параметра определяются конфигурацией электромотора и будут постоянными величинами. Значит, электромагнитная сила будет пропорциональна силе тока  $I$ . Возникающую во время работы электромотора силу называют моментом силы. Момент силы пропорционален силе тока. Обозначим коэффициент пропорциональности как  $k_T$ , тогда получим

$$T = k_T \cdot I.$$

Этот коэффициент  $k_T$  называется константой момента силы. Константа момента силы определяется конфигурацией электромотора, единицей измерения её являются [Н·м/А].

Когда катушка ротора вращается, магнитное поле, образованное постоянными магнитами, будет смещаться. В этот момент в катушке возникает электродвижущая сила, направление которой определяется правилом правой руки Флеминга. Другими словами, вырабатывается электричество. То есть даже когда электромотор постоянного тока работает от внешнего источника электроэнергии как мотор, в нём всё равно вырабатывается электричество.

Если правило правой руки Флеминга записать в виде формулы, то получим формулу для нахождения электродвижущей силы при движении проводника в магнитном поле:

$$e = B \cdot l \cdot v.$$

В этой формуле тоже электромагнитная индукция  $B$  и длина проводника  $l$  определяются конфигурацией электрического мотора. Другими словами, порождённая движением электродвижущая сила  $e$  пропорциональна скорости движения проводника  $v$ . Скорость проводника – это количество оборотов. Значит, электродвижущая сила пропорциональна количеству оборотов. Если обозначить коэффициент пропорциональности за  $k_E$ , то получим следующую формулу:

$$E = k_E \cdot \omega.$$

Константа  $k_E$  называется константой электродвижущей силы, которая определяется конфигурацией электрического мотора. Единицей измерения её является [В·с/рад]. Здесь  $\omega$  [рад/с] – количество оборотов.

Направление возникающей при работе электромотора электродвижущей силы обратно направлению электрического тока, вращающего электромотор. Эта электродвижущая сила используется, когда нужно снизить силу тока в электромоторе. Другими словами, она действует в направлении, обратном внешнему напряжению, от которого работает электродвигатель. Поэтому электродвижущую силу при движении проводника в магнитном поле называют иногда обратной электродвижущей силой.

В электромоторах постоянного тока отношения между  $K_T$  и  $K_E$  постоянны. Если находим один коэффициент, то автоматически находим и второй. Если использовать международную систему единиц СИ, то эти коэффициенты будут равны

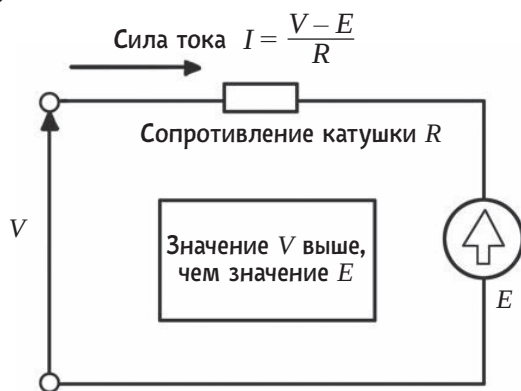
$$K_T [\text{Н} \cdot \text{м} / \text{А}] = K_E [\text{В} \cdot \text{с} / \text{рад}].$$

Поэтому в рекламных каталогах электромоторов указывают только какую-то одну из этих констант. Константа момента силы и константа электродвижущей силы при движении проводника в магнитном поле являются важными техническими характеристиками электрических моторов.



### ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЦЕПИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА И СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ТАКИМИ ЭЛЕКТРОМОТОРАМИ

На рис. 3.3 представлена схема электрической цепи, изображающая особенности работы электромоторов постоянного тока, использующих постоянные магниты. Такая схема называется эквивалентной схемой цепи. Здесь  $R$  – это сопротивление катушки.



**Рисунок 3.3. Эквивалентная схема цепи для электрического мотора постоянного тока с постоянными магнитами**

Используя эквивалентную схему цепи, составим уравнение для напряжения. Уравнение напряжения выражает взаимоотношение между используемой электромотором силой тока  $I$  и напряжением  $V$ , поступающим извне на контакты электромотора. В уравнении используем константу цепи:

$$V = RI + E = RI + K_E \omega.$$

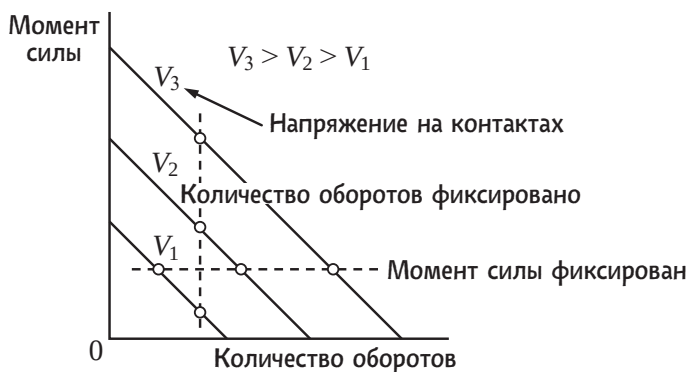
Преобразуем уравнение, чтобы выразить силу тока:

$$I = \frac{V - K_E \omega}{R}.$$

А теперь, используя полученное уравнение, найдём момент силы:

$$T = K_T \cdot I = \frac{K_T}{R} (V - K_E \omega).$$

Отраженные в этой формуле отношения момента силы и частоты вращения представлены на рис. 3.4.



**Рисунок 3.4. Скорость и момент силы электромотора постоянного тока с постоянными магнитами**

Рассмотрим, что же изображено на этом рисунке. Если поступающее извне на контакты электромотора напряжение зафиксировать, то соотношение между моментом силы и количеством оборотов будет выражено прямой линией, наклонённой вправо. Если момент силы низкий, то количество оборотов увеличивается. Если же напряжение источника тока увеличивается от  $V_1 > V_2 > V_3$ , то эта прямая будет перемещаться параллельно вверх. Другими словами, повышая напряжение в источнике тока, можно увеличить количество оборотов, кроме того, и момент силы станет больше.

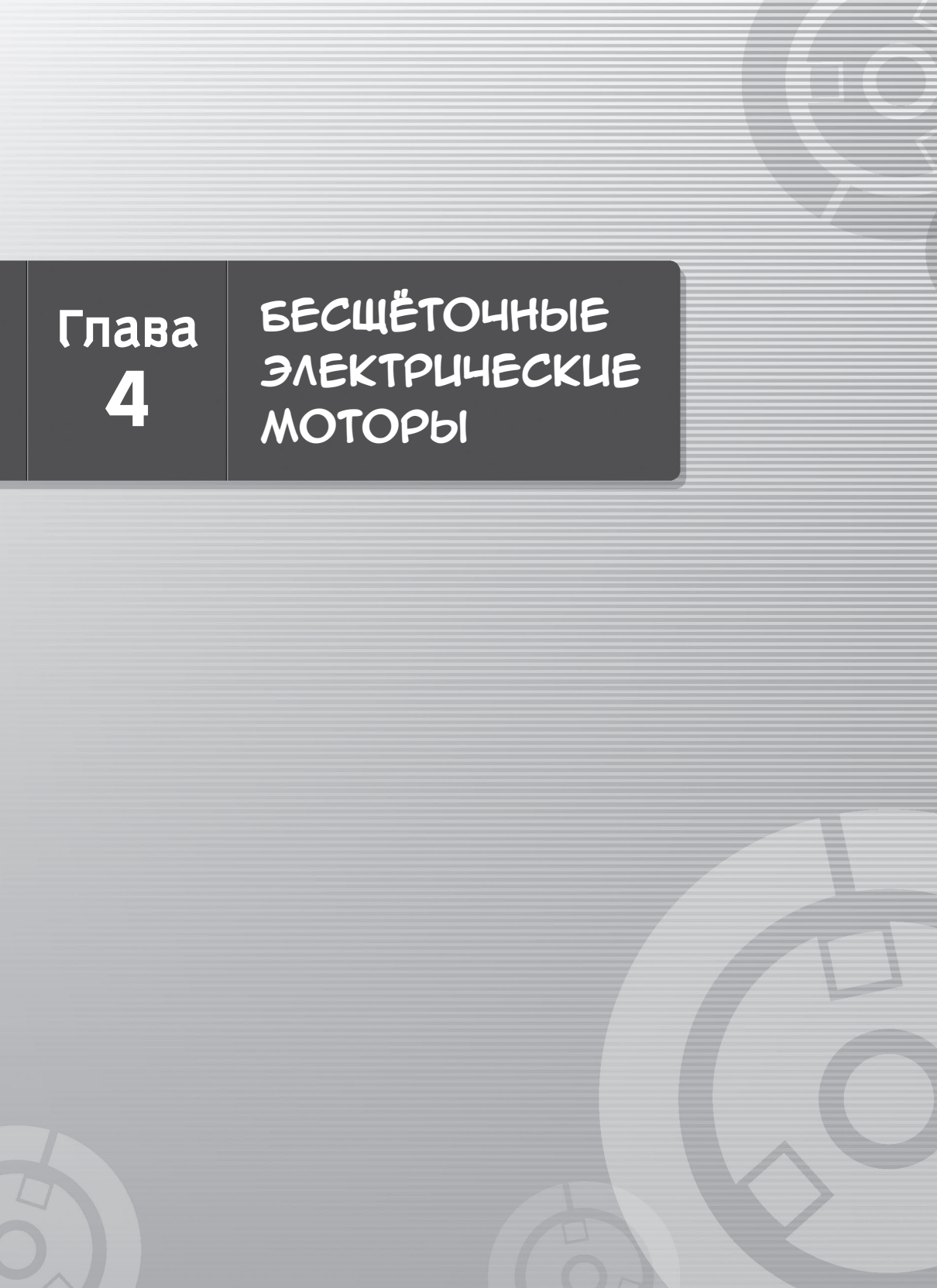
На рисунке видно, что если мы фиксируем значение момента силы, то количество оборотов будет обозначено точкой на прямой, соответствующей определённому напряжению. Аналогично, если мы фиксируем количество оборотов, эти точки будут перемещаться при изменении напряжения. Следовательно, регулируя напряжение, можно добиться нужных значений момента силы и количества оборотов электромотора<sup>1</sup>. Так как в электромоторах постоянного тока можно управлять количеством оборотов и моментом силы посредством регулировки напряжения, эти электромоторы с давних пор часто используются.

<sup>1</sup> В отечественной литературе часто приняты термины электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока.

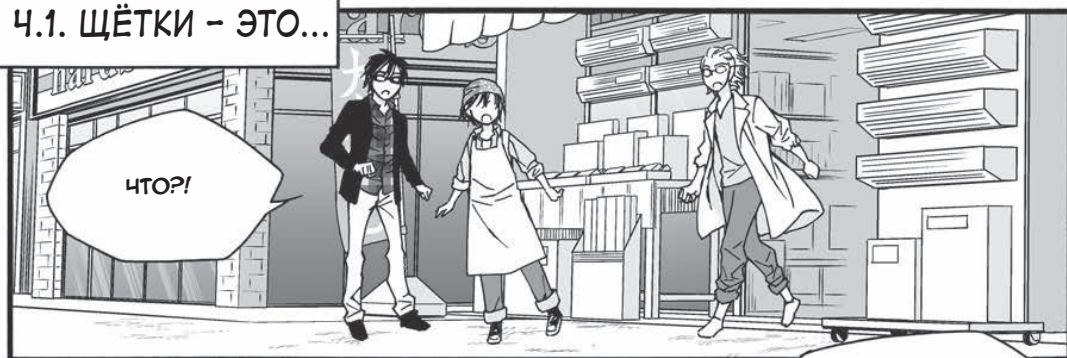


# Глава 4

## БЕСЩЁТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОТОРЫ

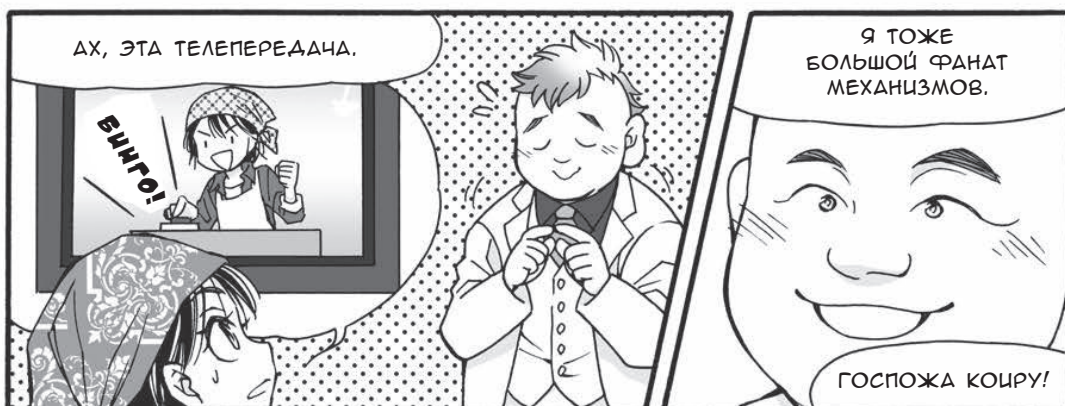


## 4.1. ЩЁТКИ – ЭТО...









...ОНИ СОПРИКАСАЮТСЯ  
И ПОЭТОМУ ПОСТОЯННО  
ТРУТСЯ ДРУГ О ДРУГА  
ПРИ ВРАЩЕНИИ.



ИЗ-ЗА ТАКОГО  
ПОСТОЯННОГО ТРЕНИЯ  
ЩЁТКИ ИЗНАШИВАЮТСЯ, И  
ЧАСТИ ИХ ОТВАЛИВАЮТСЯ...

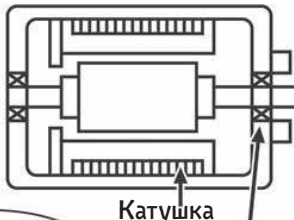


...ИЗ-ЗА ЧЕГО  
ПОЯВЛЯЮТСЯ ИСКРЫ.

И ВОТ, ЧТОБЫ  
ИЗБАВИТЬСЯ ОТ  
ЭТИХ НЕДОСТАТКОВ  
ЭЛЕКТРОМOTOРОВ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА, БЫЛИ  
ПРЕДУМАНЫ...



...БЕСЩЁТОЧНЫЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
МОТОРЫ!



Катушка

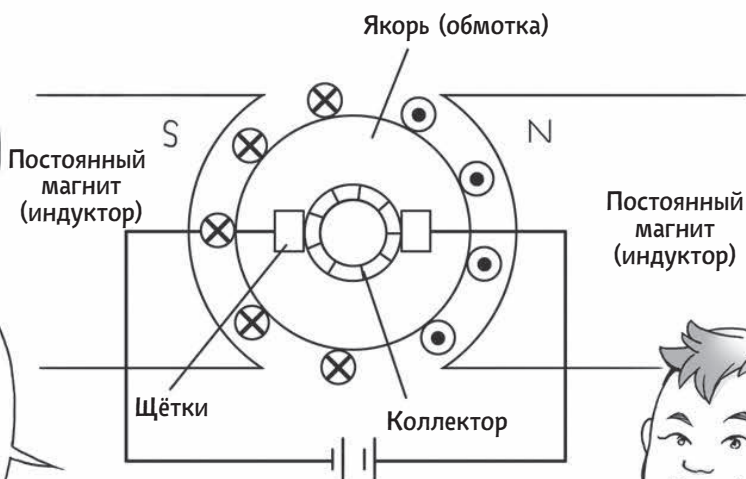
Нет ни щёток,  
ни коллектора

БЕСЩЁТОЧНЫЕ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ.

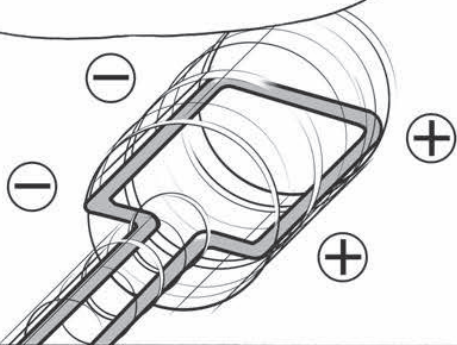
НО РАЗВЕ МОЖНО ВРАЩАТЬ  
КАТУШКУ, ЕСЛИ НЕТ ЩЁТОК?!

ИЗНАЧАЛЬНО  
В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА КАТУШКА  
ПОСРЕДСТВОМ  
КОЛЛЕКТОРА  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО  
ПРИСОЕДИНЕНА  
К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ЦЕПИ...

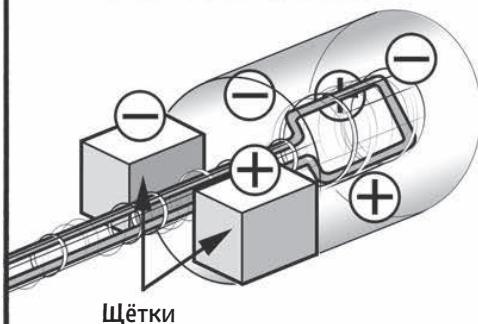
...И НАПРАВЛЕНИЕ  
ТОКА В ЛЕВОЙ И  
ПРАВОЙ ЧАСТЯХ  
РОТОРА РАЗНОЕ.



ЧТОБЫ ПОЛЯРНОСТЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
В КАЖДОЙ ИЗ КАТУШЕК БЫЛА  
ПРАВИЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕНА...



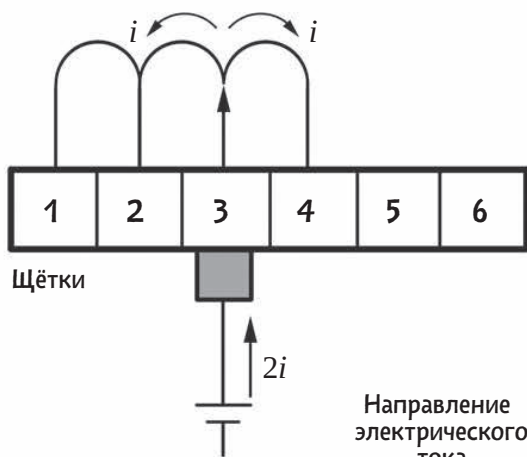
...НУЖНО ПОСРЕДСТВОМ ЩЁТОК  
ПРАВИЛЬНО ПОДАВАТЬ ТОК НА  
КАЖДУЮ КАТУШКУ.



В  
ЭЛЕКТРОМОТОРАХ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА ТОК  
ПОСТУПАЕТ  
С "ПЛЮСОВОЙ"  
ЩЁТКИ...

РАЗДЕЛЯЕТСЯ НА ДВЕ  
ЧАСТИ, ПРОХОДИТ ПО  
РОТОРУ И СОБИРАЕТСЯ  
НА "МИНУСОВОЙ" ЩЁТКЕ!

ЕСЛИ ИЗООБРАЗИТЬ ЭТО НА РИСУНКЕ,  
ТО ВОТ ЧТО ПОЛУЧИМ.

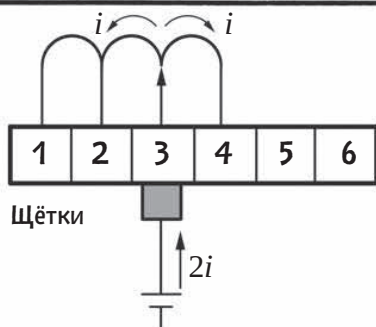


ВОТ ЭТО ОТ 1 ДО 6,  
ЭТО КОЛЛЕКТОР, ЧТО ЛИ?

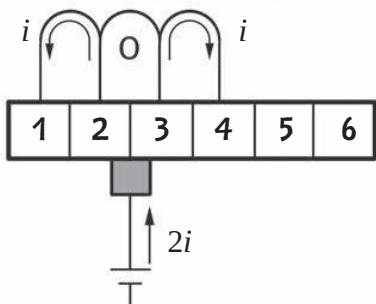
АА, НА САМОМ ДЕЛЕ ЕГО  
КОНТАКТНЫЕ ПЛАСТИНЫ  
СОЕДИНЕНЫ ПО КРУГУ,  
НО ЧТОБЫ БЫЛО  
БОЛЕЕ НАГЛЯДНО,  
Я ИЗООБРАЗИЛ ИХ ТАК.



КОГДА ЩЁТКА  
НАХОДИТСЯ  
В УКАЗАННОМ МЕСТЕ,  
ТОК СНАЧАЛА ПОСТУПИТ  
В КОНТАКТНУЮ  
ПЛАСТИНУ 3,  
А ЗАТЕМ ПОТЕЧЁТ  
НА СОСЕДНИЕ  
СПРАВА И СЛЕВА  
ПЛАСТИНЫ.



КОГДА ЖЕ ЩЁТКА ВОТ  
В ТАКОЙ ПОЗИЦИИ,  
ЧТО ОНА КАСАЕТСЯ  
И ПЛАСТИНЫ 2,  
И ПЛАСТИНЫ 3,  
ТО ТОК С ЭТИХ  
ПЛАСТИН ПОТЕЧЁТ  
В СТОРОНУ ДВУХ  
ВНЕШНИХ ПЛАСТИН,  
ПО КРАЯМ  
ОТ ПЛАСТИН 2 И 3...



...А В КАТУШКУ, КОТОРАЯ  
В ЭТОТ МОМЕНТ ПОСЕРЕДИНЕ  
МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ  
КОЛЛЕКТОРА 2 И 3,  
ТОК НЕ ПОТЕЧЁТ.

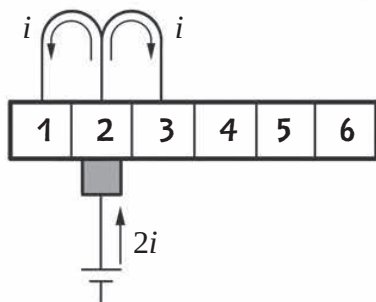
Электрический  
ток

Я оказалась  
ровно посередине.

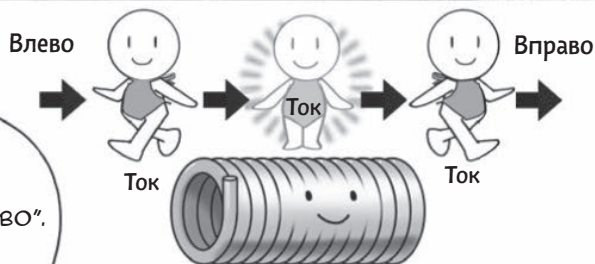
Электрический  
ток



СООТВЕТСТВЕННО,  
ИЗ ЭТОГО  
ПОЛОЖЕНИЯ  
ТОК ПОТЕЧЁТ  
С ПЛАСТИНЫ 2  
НА ПРАВУЮ И ЛЕВУЮ  
ОТ НЕЁ ПЛАСТИНЫ.

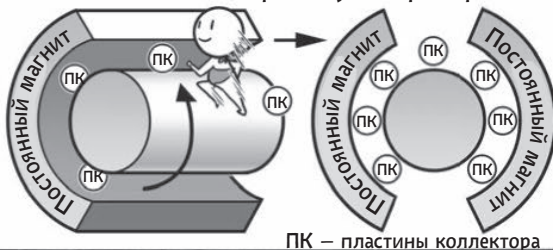


ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
В КАТУШКЕ,  
НАХОДЯЩЕЙСЯ  
МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ  
КОЛЛЕКТОРА 2 и 3,  
ТОК ПОТЕЧЁТ  
В ТАКОМ ПОРЯДКЕ:  
"ВЛЕВО → НОЛЬ (НИКУДА) → ВПРАВО".



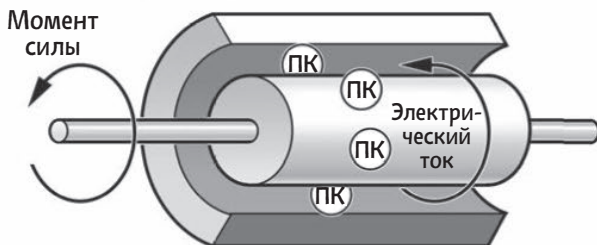
ЕСЛИ КАТУШКИ  
СОЕДИНЕНЫ ПРАВИЛЬНО,  
ТО БЛАГОДАРЯ ЩЁТКАМ  
И ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ  
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ  
НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА  
ВО ВСЕХ КАТУШКАХ  
БУДЕТ ОДИНАКОВЫМ...

Вид спереди будет примерно такой



ПК — пластины коллектора

...И НАПРАВЛЕНИЕ  
МОМЕНТА СИЛЫ ТАКЖЕ  
БУДЕТ ОДИНАКОВЫМ.



А В БЕСЩЁТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ВМЕСТО ЩЁТОК ИСПОЛЬЗУЮТ  
ЭЛЕКТРОННЫЙ КОНТРОЛЛЕР, РЕГУЛИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК!



ЭЛЕКТРОННЫЙ КОНТРОЛЛЕР?!

## 4.2. ПРИНЦИП РАБОТЫ БЕСЩЁ-ТОЧНОГО ЭЛЕКТРОМОТОРА

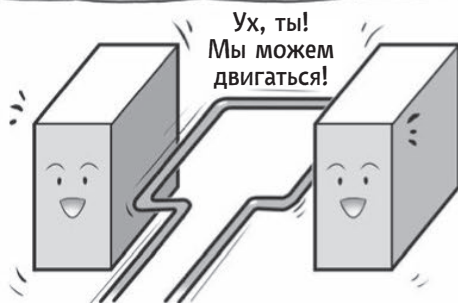


И СЕЙЧАС Я, КАНЭМАРУ ФУКУСУКЭ, ОБЪЯСНЮ ВАМ ПРИНЦИП РАБОТЫ БЕСЩЁТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОТОРА.

В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МОТОРЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОМЕСТИМ КАТУШКУ НА СТАТОР И ЗАФИКСИРУЕМ, ЧТОБЫ ОНА НЕ ВРАЩАЛАСЬ.



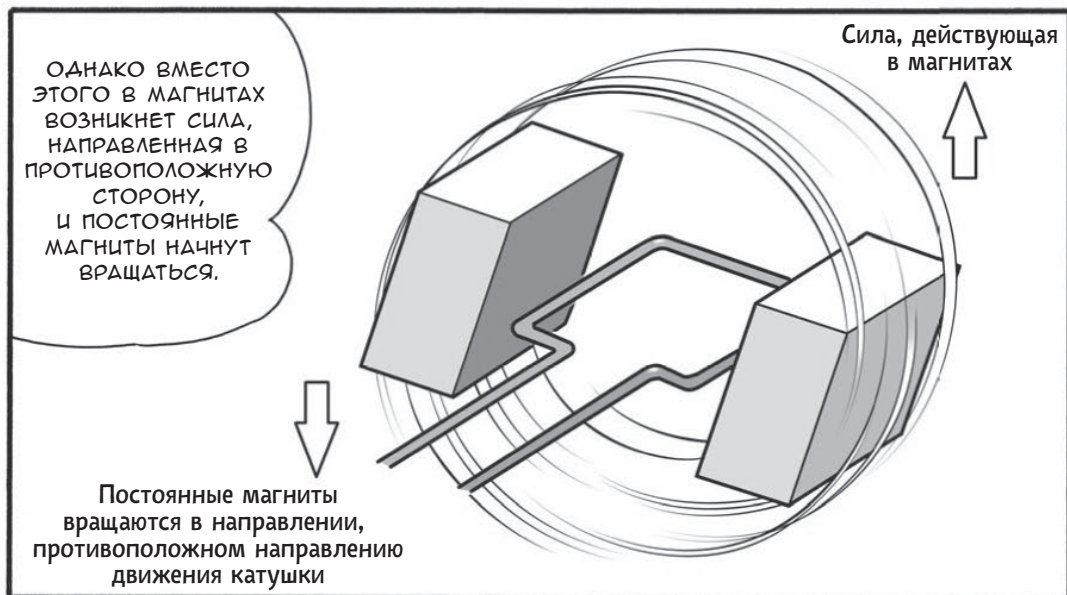
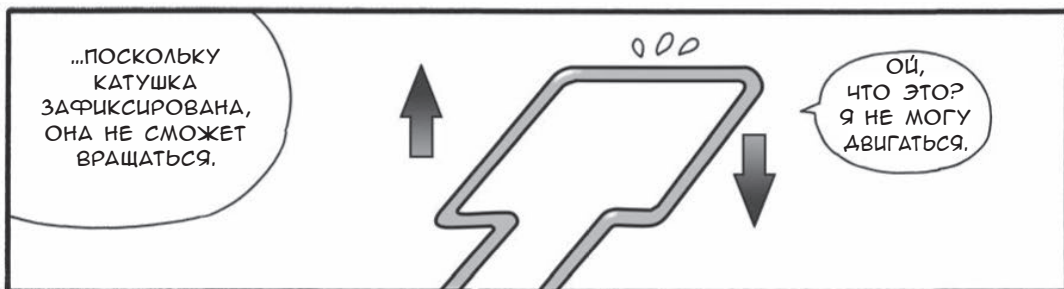
И СДЕЛАЕМ ТАК, ЧТОБЫ ВРАЩАТЬСЯ МОГЛИ ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ.

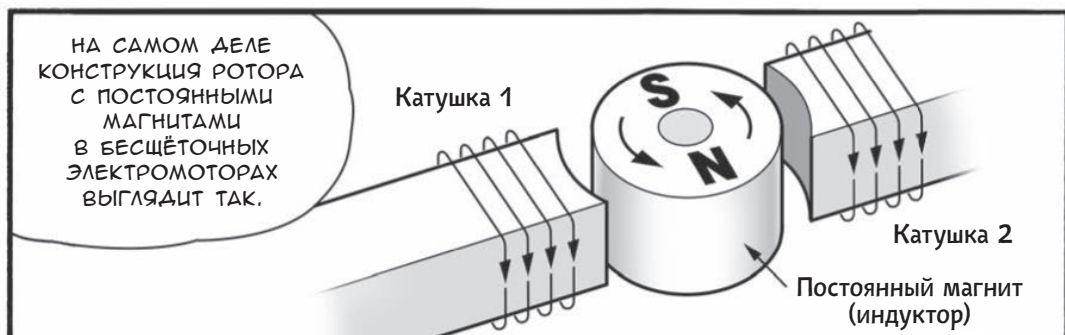


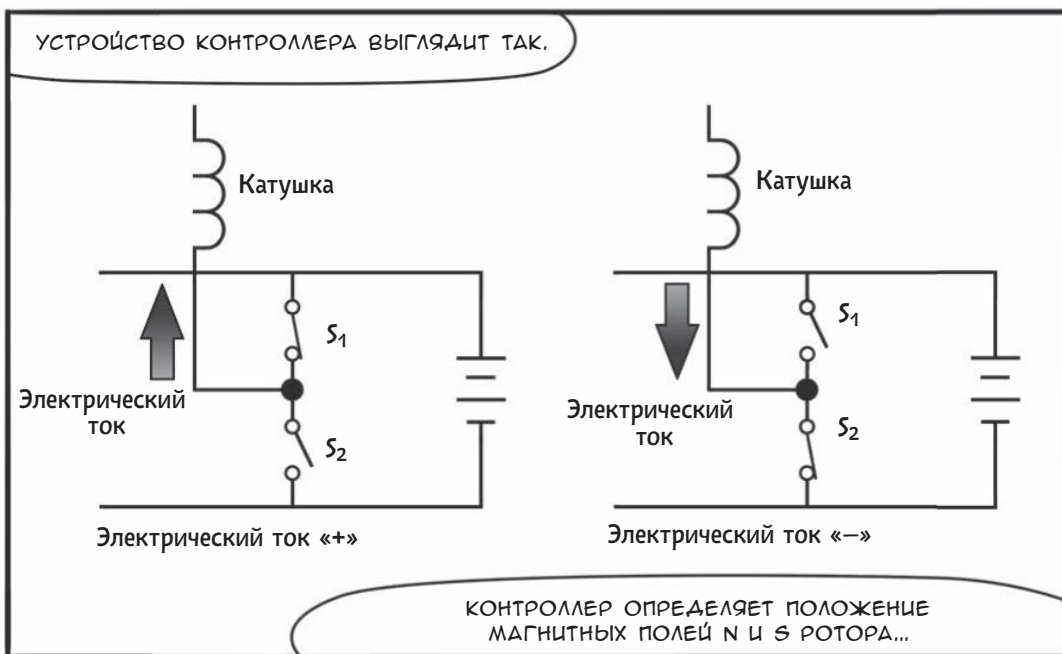
В ТАКОЙ СИТУАЦИИ, ЕСЛИ ПО КАТУШКЕ ПУСТИТЬ ТОК, В НЕЙ ВОЗНИКНЕТ СИЛА, НО...





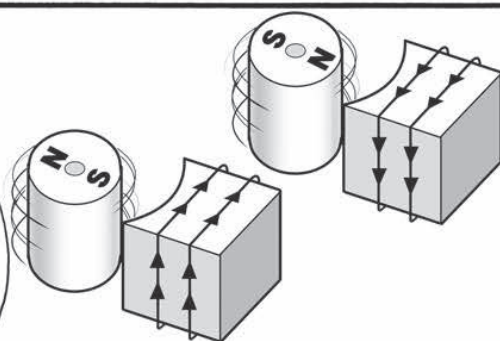




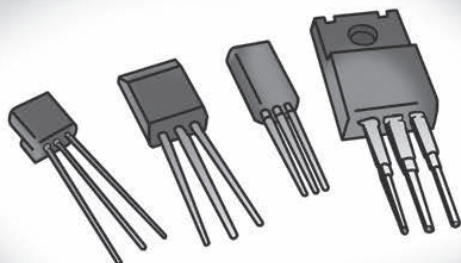




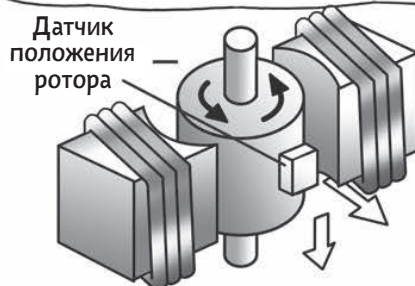
ЕСЛИ ОСУЩЕСТВЛЯТЬ  
ВРАЩЕНИЕ  
ТАКИМ ОБРАЗОМ,  
В СООТВЕТСТВИИ  
С ПОЛЯРНОСТЬЮ  
ПОСТОЯННЫХ  
МАГНИТОВ РОТОРА,  
ТО СТАНОВЯТСЯ  
НЕ НУЖНЫ ЩЁТКИ  
И КОЛЛЕКТОР,  
МЕНЯЮЩИЕ  
НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА.



ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ,  
НАПРИМЕР, ТРАНЗИСТОРАМИ.

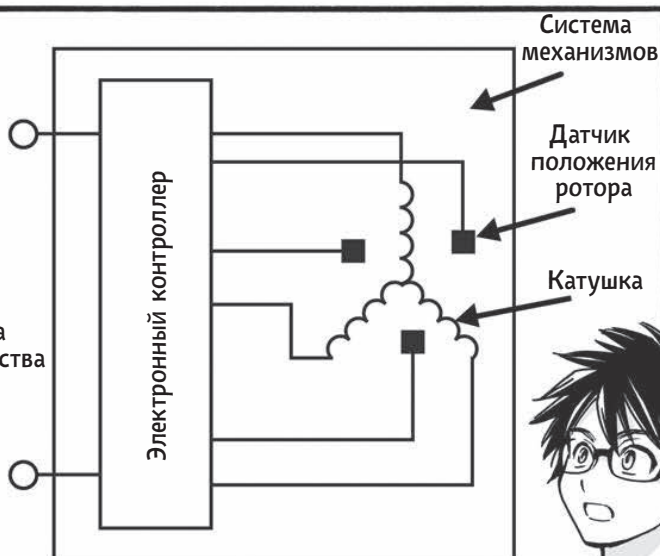


А ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПОЛЮСОВ  
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ  
"ДАТЧИКОМ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА".



ТАКИМ ОБРАЗОМ,  
БЕЩЁТОЧНЫЙ  
ЭЛЕКТРОМОТОР  
ПРЕДСТАВЛЯЕТ  
ИЗ СЕБЯ ЦЕЛУЮ  
СИСТЕМУ  
МЕХАНИЗМОВ,  
ВКЛЮЧАЮЩУЮ  
ЭЛЕКТРОННЫЙ  
КОТРОЛЛЕР И ДАТЧИК  
ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА.

Подача  
электричества



ПРИНЦИП ВОЗНИКНОВЕНИЯ  
МОМЕНТА СИЛЫ В БЕСЩЁТОЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ТАКОЙ ЖЕ,  
КАК У ЭЛЕКТРОМОТОРОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА!

ПОЭТОМУ  
ИХ ЕЩЁ  
НАЗЫВАЮТ  
"БЕСЩЁТОЧНЫЕ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА",  
ХОТЯ  
ПРОИЗВОДСТВО  
ЭНЕРГИИ У НИХ  
ПРОИСХОДИТ  
ПО-НОВОМУ!

ДАМЫ И ГОСПОДА! ТАК ЖЕ И ЭТУ  
УЛИЦУ НЕОБХОДИМО ОБНОВИТЬ!

!!

ЕСЛИ НЕ УБРАТЬ ВСЕ  
БЕСПОЛЕЗНЫЕ ЛИШНИЕ ЧАСТИ...

...ТО ЭТО МЕСТО ПРИДЁТ В УПАДОК!

.....!

### 4.3. УСТРОЙСТВО БЕСЩЁТОЧ- НОГО ЭЛЕКТРОМОТОРА

\* Ган – дружеское прозвище героя, скорее всего, происходящее от слова «упрямый, нестигаемый».

АХ, ЭТО ВЫ ТУТ!

ЗАДУМАЛИ СКУПИТЬ ВСЮ НАШУ УЛИЦУ  
И ПЕРЕДЕЛАТЬ ТУТ ВСЁ НА СВОЙ ЛАД!

ПАПА!

ДАВАЙ, ГАН\*!

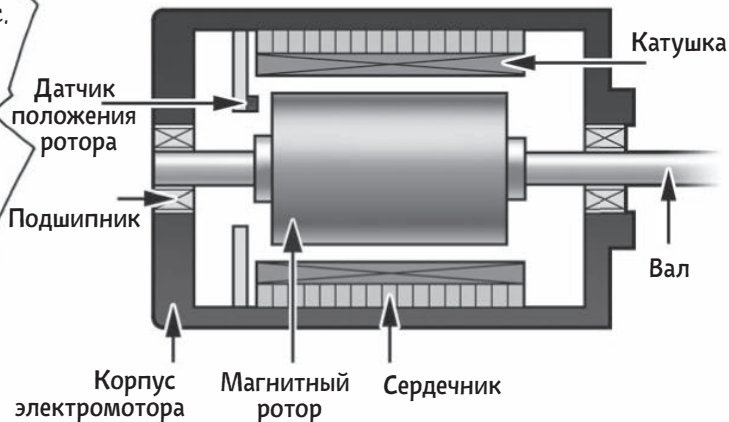
КАК ГОСПОДИН  
ИВАДЗИРО ВЫШЕЛ,  
СРАЗУ СТАЛО  
СПОКОЙНЕЕ НА ДУШЕ!

НАПЛЕЛ ТУТ ПРО  
МОТОРЫ, ЧТОБЫ  
ТОЛЬКО ДОБИТЬСЯ  
СВОЕГО!

БЕСЩЁТОЧНЫЕ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
И ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА – ЭТО ОДНИ  
И ТЕ ЖЕ МОТОРЫ!

РОТОР В СТАТОР,  
ПОДШИПНИКИ НА КОРПУС.

А В ЦЕЛОМ  
УСТРОЙСТВО  
БЕСЩЁТОЧНОГО  
МОТОРА ОСТАЁТСЯ  
ТАКИМ ЖЕ,  
КАК У МОТОРА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА!





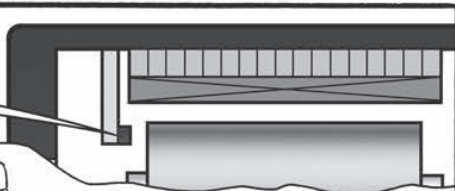
НО ВОТ ЗДЕСЬ ЖЕ  
НАХОДИТСЯ ДАТЧИК  
ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА,  
А ЭТО СОВСЕМ НОВЫЙ  
МЕХАНИЗМ.



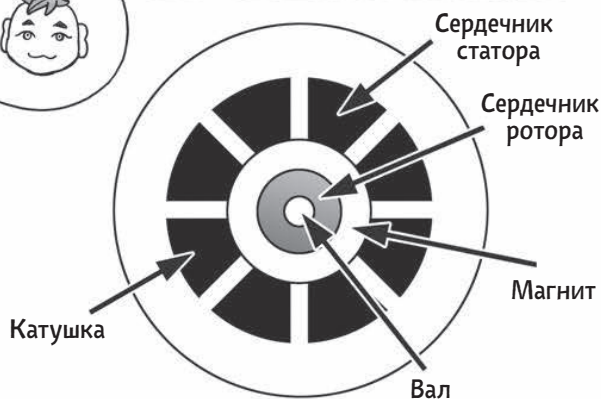
ЧТО ТЫ ПРИЦЕПИЛСЯ  
К ЭТОЙ МЕЛОЧИ! ХОЧЕШЬ  
СО МНОЙ ПОСПОРИТЬ!?



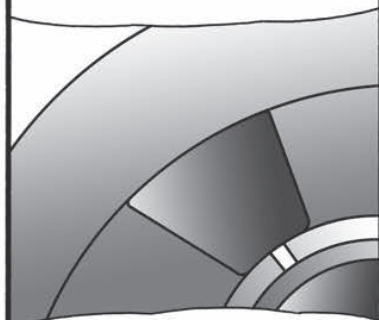
ГАН, ВИДАТЬ, ХОЧЕТ ПОСПОРИТЬ.



МОЖЕМ И ПОСПОРИТЬ.  
ВОТ ЭТО - ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ  
БЕСЩЕТОЧНОГО МОТОРА.



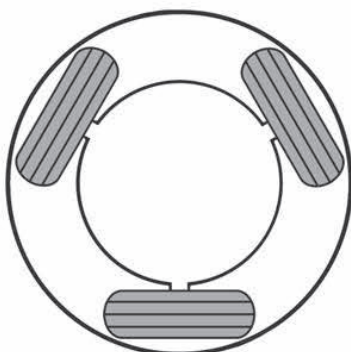
В СЕРДЕЧНИКЕ СТАТОРА  
ЕСТЬ ТАКИЕ ВЫЕМКИ,  
НАЗЫВАЕМЫЕ "ПАЗЫ".



В ЭТИ ПАЗЫ  
УКЛАДЫВАЕТСЯ  
ОБМОТКА КАТУШКИ.

ЧАСТО КАТУШКА НАМАТЫВАЕТСЯ  
МЕЖДУ ДВУМЯ СОСЕДНИМИ ПАЗАМИ.

ТАКАЯ ОБМОТКА НАЗЫВАЕТСЯ  
"КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ".



НА ПОВЕРХНОСТИ  
РОТОРА НАХОДИТСЯ  
ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ...

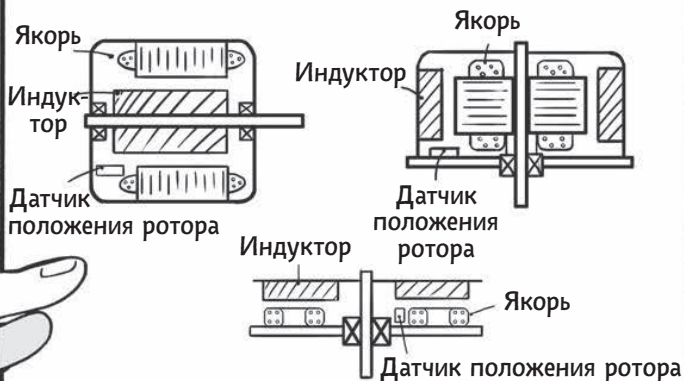


...А МЕЖДУ НИМ И ВАЛОМ  
НАХОДИТСЯ ЖЕЛЕЗНЫЙ  
СЕРДЕЧНИК.

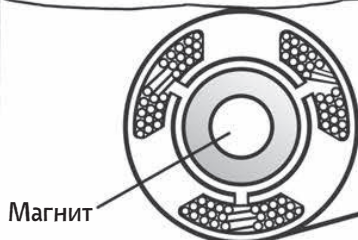
БЕСЩЕТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ КОНСТРУКЦИЮ, ПОЗВОЛЯЮЩУЮ ВРАЩАТЬСЯ ПОСТОЯННОМУ МАГНИТУ, ИСПОЛЪЗУЕМОМУ В КАЧЕСТВЕ РОТОРА.



ПОЭТОМУ РАССМОТРИМ ТРИ ТАКИЕ КОНФИГУРАЦИИ.

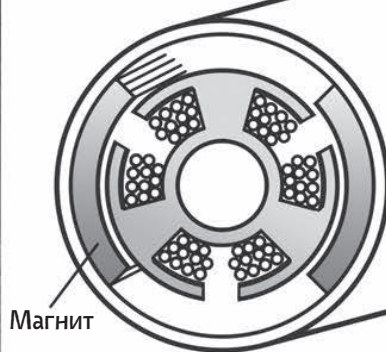


В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ОБЫЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИСПОЛЪЗУЕТСЯ ТАК НАЗЫВАЕМЫЙ "ВНУТРЕННИЙ" РОТОР...

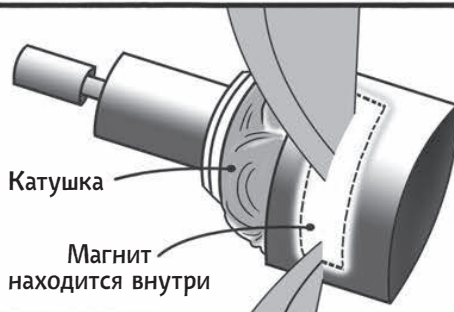


КОГДА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ ВРАЩАЕТСЯ ВНУТРИ, А СНАРУЖИ РАСПОЛАГАЕТСЯ ОБМОТКА.

ЕСЛИ ЖЕ РОТОР "ВНЕШНИЙ", ТО ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ ВРАЩАЕТСЯ ВОКРУГ ОБМОТКИ.

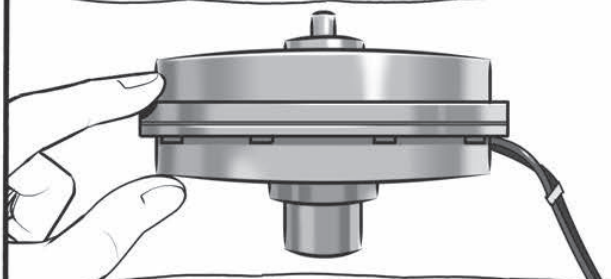


ТАКИЕ РОТОРЫ МОГУТ НЕПОСРЕДСТВЕННО ИСПОЛЪЗОВАТЬСЯ, НАПРИМЕР, В ВЕНТИЛЯТОРАХ ИЛИ КАБЕСТАНАХ (МЕХАНИЗМ ДЛЯ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ГРУЗА)...



...ЧТО ПОЗВОЛЯЕТ УМЕНЬШИТЬ КОНСТРУКЦИЮ МЕХАНИЗМОВ.

И НАКОНЕЦ, ЕСТЬ "ДИСКОВЫЕ" РОТОРЫ,  
КОГДА НАД ПЛОСКОЙ КАТУШКОЙ ВРАЩАЕТСЯ  
ДИСКОБРАЗНЫЙ РОТОР.



ТАКАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПРИВЕЛА К СОЗДАНИЮ  
ПЛОСКИХ ЭЛЕКТРОМОТОРОВ.

И ТАКИЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
ЧАСТО ИСПОЛЗУЮТСЯ  
В АУДИО- И ВИДЕОСИСТЕМАХ.



ТАК ЧТО ВСЕГО ЛИШЬ  
БЛАГОДАРЯ ВНЕДРЕНИЮ  
ПРОСТОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО  
МЕХАНИЗМА, ПОЗВОЛЯЮЩЕГО  
МЕНЯТЬ ПОЛЯРНОСТЬ ЭЛЕКТРИ-  
ЧЕСКОГО ТОКА...

„СТАЛО ВОЗМОЖНЫМ СОЗДАНИЕ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОВ РАЗНЫХ ФОРМ. ТО  
ЕСТЬ СТАЛО ВОЗМОЖНЫМ РАЗВИТИЕ!



ТАК ДАВАЙТЕ И ЭТОЙ УЛИЦЕ  
ДАДИМ РАЗВИТИЕ,  
ОБЪЕДИНИВ НАШИ УСИЛИЯ...





# ДОПОЛНЕНИЕ



## ФУНКЦИЯ ЩЁТОК

Бесщёточными электромоторами мы называем электромоторы постоянного тока, не имеющие щёток. В главе про электромоторы постоянного тока мы рассмотрели устройство щёток, теперь же рассмотрим их функцию.

Коллектор вращается, постоянно соприкасаясь со щётками. По ходу вращения коллектора его контактные пластины касаются щёток по очереди. На рис. 4.1 изображен развернутый по прямой вид вращающегося коллектора. На данном рисунке вращение представлено движением слева направо. На схеме (а) щётка касается контактной пластины номер 3, и поступающий через щётку ток делится между двумя соседними катушками, справа и слева. В таком случае по катушке (2–3), расположенной между контактными пластинами 2 и 3, потечёт ток, направленный влево. Если же коллектор сдвинется, как показано на схеме (б), то ток, пройдя через пластины 2 и 3, потечёт дальше вправо и влево. В этом случае ток в катушке (2–3) будет нулевым. Двигаясь дальше до положения, изображённого на схеме (в), щётка опять будет касаться только одной пластины, теперь под номером 2. В этом положении ток, поступающий на катушку (2–3), будет направлен вправо.

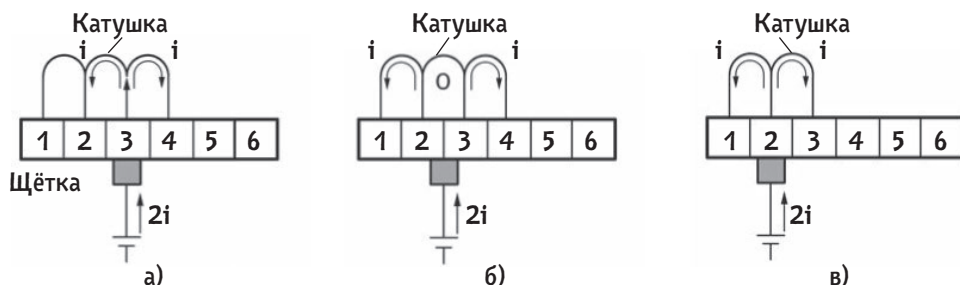


Рисунок 4.1. Перемещение коллектора при вращении

Другими словами, при таком перемещении (вращении), как показано на схемах от (а) до (в), в каждой катушке направление тока будет меняться. Если рассматривать каждую катушку в отдельности, то постоянно меняющий своё направление ток, проходящий через катушку, будет переменным током. Действие щёток и коллектора в этом случае называется «выпрямлением». Это название происходит от подобного действия в электрогенераторах, так как электрогенераторы были изобретены раньше электромоторов. В электрогенераторах, несмотря на то что в катушках течёт переменный ток, благодаря действию щёток и коллектора на выходе получается постоянный ток, поэтому-то такое действие и называется «выпрямлением».



## ЗА СЧЁТ ЧЕГО РАБОТАЮТ БЕСЩЁТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ

Принцип работы бесщёточных электромоторов рассмотрим в соответствии с электромоторами постоянного тока. На рис. 4.2 изображён базовый принцип работы бесщёточного электромотора. Ротор бесщёточного электромотора представлен постоянным магнитом. Большое отличие от электромоторов постоянного тока состоит в том, что в качестве ротора в бесщёточных электромоторах вращается постоянный магнит. На рисунке изображены две катушки. Электрический ток в них течёт так, как это показано стрелочками на рисунке.

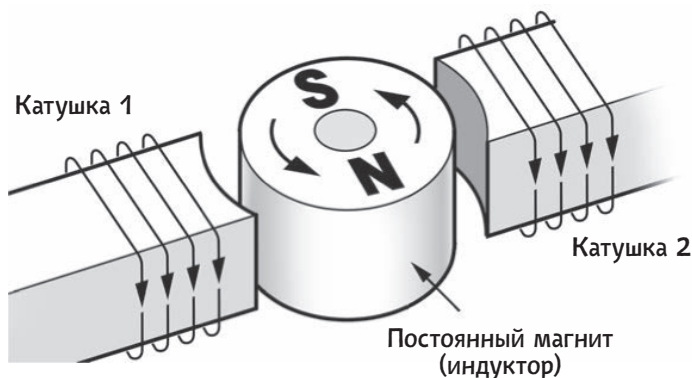


Рисунок 4.2. Принцип работы бесщёточного электромотора

В таком случае внутри катушки 1 возникнет магнитное поле с полюсом N, а в катушке 2 – с полюсом S. Каждая из катушек будет притягивать противоположный полюс ротора и отталкиваться от одноимённого, и таким образом в роторе возникнет сила, вращающая его против часовой стрелки.

Магнит будет поворачиваться, и вместе с ним будут смещаться его магнитные полюса N и S. И когда, например, к поверхности катушки 1 приблизится полюс ротора S, то благодаря силе притяжения ротор в этой позиции и остановится. Следовательно, если здесь не поменять направление тока в катушках и не заставить тем самым полюса ротора оттолкнуться, то вращение ротора не сможет продолжаться. Поэтому для работы бесщёточных электромоторов необходимо постоянно менять направление тока в катушках. Для этого определяют, какой магнитный полюс, N или S, находится ближе всего к катушке, и в соответствии с этим регулируют направление тока.



## ЗАМЕНА ЩЁТОК ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ

Взаимосвязь щёток, коллектора и катушек в электромоторе постоянного тока показана на рис. 4.3. Здесь рассмотрен случай для трех катушек. Значит, и коллектор разделен на три части. На рисунке щётки изображены внутри коллектора, но на самом деле они располагаются снаружи. К одной из щёток присоединён плюсовой контакт, к другой – минусовой. На рисунке одна из щёток соединяется с контактной пластиной ②, а другая щётка находится между пластинами ① и ③. Заряд щётки, соединённой с пластиной ②, положительный. Электрический ток, пройдя через пластину ②, разделится между двумя катушками ① и ③ и придёт к противоположной щётке. В катушку, находящуюся между пластинами ① и ③, электричество не поступает.

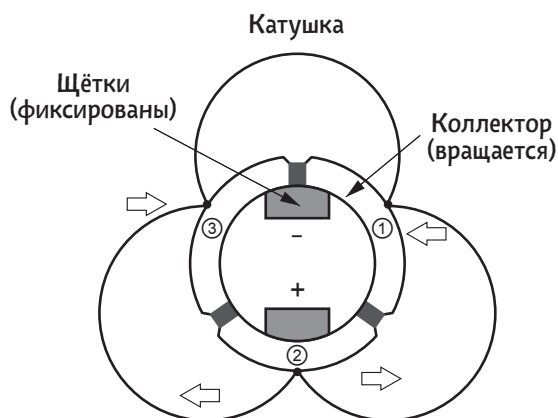
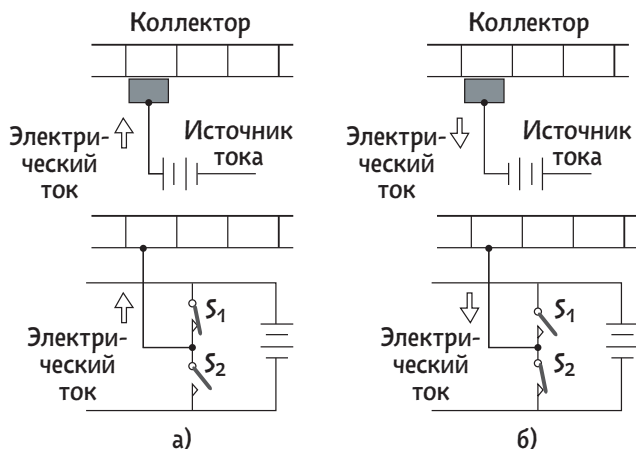


Рисунок 4.3. Взаимодействие щёток, коллектора и катушек

Это положение, когда контактная пластина ② соединяется с плюсовым контактом. Если изобразить данную ситуацию в виде схемы электрической цепи, то получим рис. 4.4, а. Если же поменять направление тока в пластине ② на противоположное, то получим схему на рис. 4.4, б. Если же использовать переключатели S1 и S2, которые поочередно будут включаться и выключаться, это даст возможность менять направление тока в катушке. На схеме рис. 4.4, а катушка соединена с плюсовым контактом источника тока, поэтому ток течёт по направлению к катушке. Обратная ситуация изображена на схеме рис. 4.4, б – катушка соединяется с минусовым контактом источника, и ток течёт от катушки. Если эти действия осуществлять в соответствии с положением магнитных полюсов постоянного магнита ротора, то можно будет менять направление тока в катушке. Другими словами, функции щёток и коллектора можно будет выполнять с помощью переключателей. В реальных же приводах используются не переключатели, а полупроводники, например транзисторы.





**Рисунок 4.4. Замена щёток и коллектора на переключатель**

Таким образом, бесщёточные электромоторы не могут работать, если они не снабжены переключателем, выполняющим функции щёток и коллектора.



## **ДАТЧИК В БЕСЩЁТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМОТОРАХ**

В бесщёточных электромоторах направление тока в катушке должно меняться в соответствии с ближайшим к катушке магнитным полюсом постоянного магнита. Для того же, чтобы определить полярность этого магнитного поля, необходим датчик. Рассмотрим способы распознавания магнитного полюса.

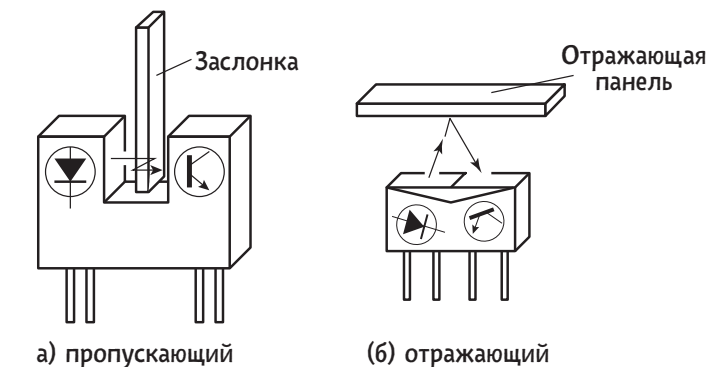
### **РАСПОЗНАВАНИЕ ПОСРЕДСТВОМ МАГНИТОМЕТРА**

Датчик, который может распознавать магнитные свойства, может распознавать и изменяющиеся при вращении магнитные потоки, и магнитные полюса N и S. Чаще всего для распознавания положения магнитных полюсов используют датчик Холла. Датчик Холла – это такой датчик, электрический ток в котором меняется в зависимости от индукции магнитного поля и его полярности.

### **ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСПОЗНАВАНИЯ**

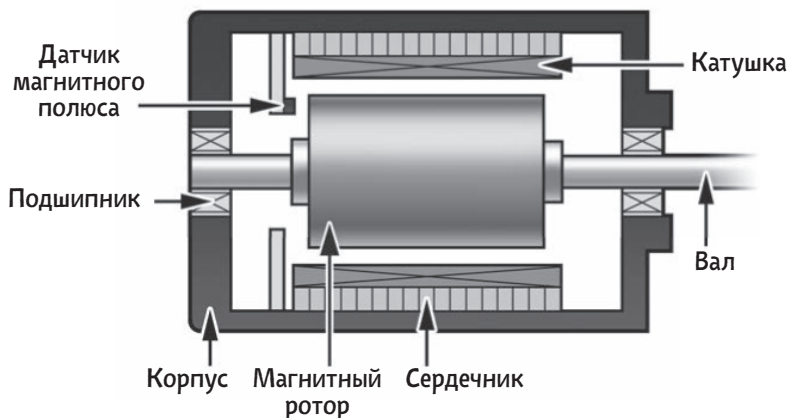
Определить положение магнита можно и с помощью света. Установим на ротор светозащитную пластину с прорезями и начнём вращение. Воспользуемся устройством, которое называется «фотоперерыватель». Фотоперерыватель реагирует на нахождение какого-либо объекта в пространстве между излучателем и приемником света. Соответственно, выходной сигнал будет включаться и выключаться в зависимости от наличия или отсутствия светозащитной пластины в поле зрения фотоперерывателя. Кроме того, бывают отражающие фотоперерыватели. В отражающих фотоперерывателях выходной сигнал будет включаться и выключаться в зависимости от наличия или отсутствия отражения.

Таким образом можно определять момент прохождения определённого положения. Принцип устройства фотопрерывателя изображён на рис. 4.5. Отличительными особенностями такого способа являются его простота и дешевизна.



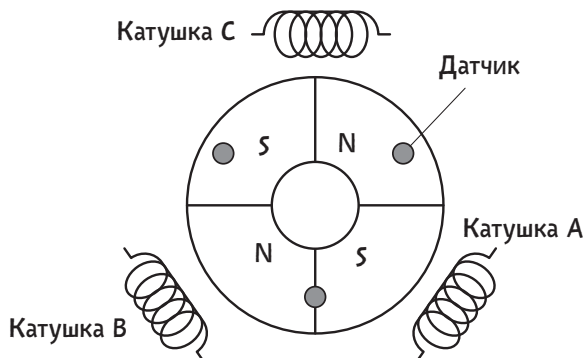
**Рисунок 4.5. Принцип работы фотопрерывателя**

Часто датчик устанавливают ближе к краям ротора. На рис. 4.6 показано поперечное сечение электромотора, где датчик установлен в противоположном конце от вала. Датчик, определив положение магнита, в соответствии с ним меняет направление тока.



**Рисунок 4.6. Бесщёточный электромотор в поперечном сечении**

Рассмотрим, как это происходит, более детально, на примере бесщёточного электродвигателя, изображённого на рис. 4.7.

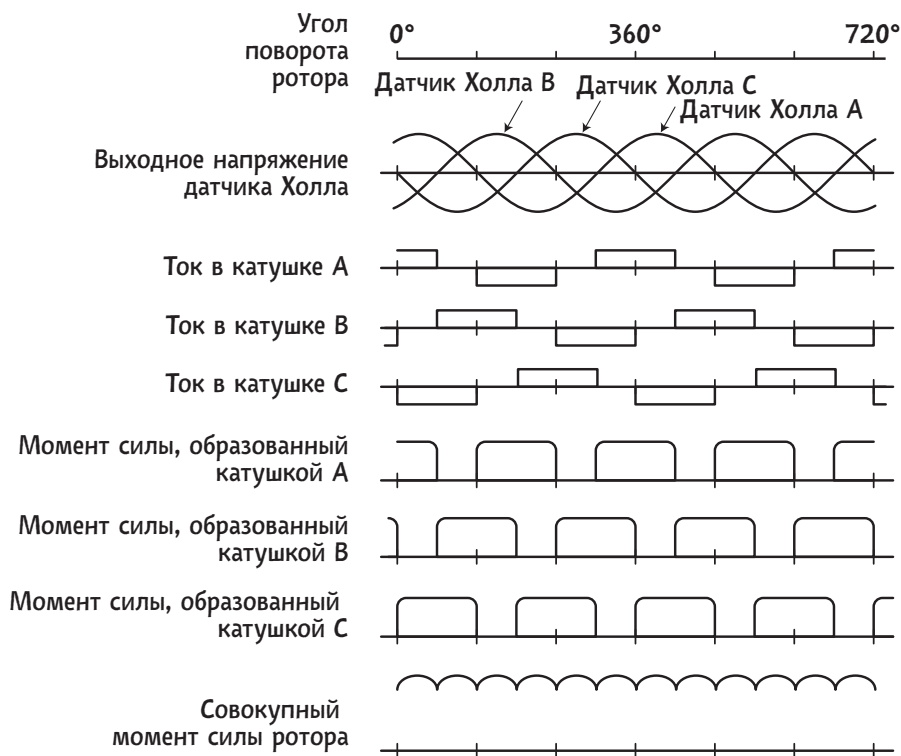


**Рисунок 4.7. Расположение датчиков на примере трёхфазного четырёхполюсного электромотора**

Данный электромотор имеет четыре магнитных полюса. Это означает, что магнитные полюса за один оборот делятся на четыре части (N, S, N, S). Количество полюсов всегда чётное. В статоре рассматриваемого электромотора три катушки. Датчики магнитных полюсов располагаются относительно местоположения катушек. Они чаще всего располагаются между парами катушек.

На рис. 4.8 изображена временная диаграмма для случая, когда используется датчик Холла. Когда выходной сигнал датчика Холла В поменяется с минуса на плюс (это называют «пересечение нуля»), то по катушке В потечёт «положительный» ток. Этот ток перестаёт поступать в катушку В в момент пересечения нуля датчиком Холла С. Когда же сигнал датчика Холла В меняется с плюса на минус, то ток в катушке В потечёт в обратном направлении. И снова этот ток отключится при пересечении нуля сигналом с выхода датчика Холла С.





**Рисунок 4.8. Переключение электричества в бесщёточном электромоторе**

При переключении тока подобным образом в каждой катушке при прохождении через неё тока будет возникать момент силы. Момент силы электромотора равен совокупности всех этих моментов силы. Поскольку ток меняется с небольшим запозданием, то при каждом моменте переключения тока момент силы немного снижается. За один оборот момент силы немного снижается шесть раз. Это называется пульсацией момента. Постоянно разрабатываются разные способы уменьшения пульсации момента.

Бесщёточный электромотор представляет собой систему, включающую, кроме привода, датчик и систему контроля. Только объединив эти составляющие, такой электромотор может выполнять свои функции.

Слово «бесщёточный» обозначает отсутствие щёток. Другими словами, «бесщёточными» можно назвать все электромоторы, в которых нет щёток. Асинхронные электромоторы, которые мы будем рассматривать дальше, также называют иногда бесщёточными по сравнению с имеющими щётки синхронными электродвигателями. Однако когда речь идёт о бесщёточных электромоторах постоянного тока, это означает особый тип электромоторов, получившийся благодаря удалению щёток из электромоторов постоянного тока. Если быть точным, то можно сказать, что это синхронные электродвигатели с постоянными магнитами, приводимые в действие электрическим током, имеющим форму меандра (прямоугольного импульса). Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами, приводимые в движение синусоидальным током, называются АС-сервоприводами.

# Глава 5

## СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛИ



## 5.1. ПЕРЕМЕН- НЫЙ ТОК

ПОХОЖЕ, ЭТИ ПАРНИ  
ВЗЯЛИСЬ ЗА НАС ВСЕРЬЁЗ.

КАЖЕТСЯ, ОНИ СОБИРАЮТСЯ СНЕСТИ  
ВСЁ НА НАШЕЙ УЛИЦЕ И ПОСТРОИТЬ  
ЗДЕСЬ ТОРГОВЫЙ ЦЕНТР.

Электроника **СЭНДО**  
и бытовая техника

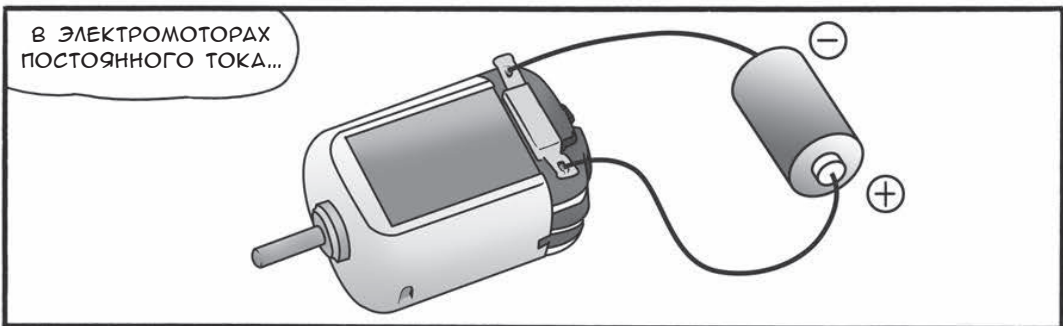
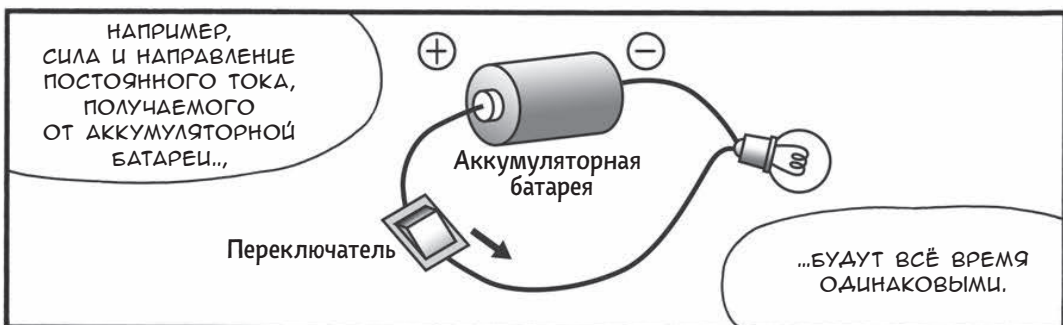
ээ...!?

И ЧТО, ЭТА ТОРГОВАЯ УЛИЦА ИСЧЕЗНЕТ?!

ЕСЛИ ТАКОЕ СЛУЧИТСЯ, МЫ, КАЖЕТСЯ,  
СМОЖЕМ ПЕРЕНЕСТИ НАШИ МАГАЗИНЫ  
В ЭТОТ ТОРГОВЫЙ ЦЕНТР, НО...

...ВОЗМОЖНО, ТОГДА  
У НАС СТАНЕТ БОЛЬШЕ  
ПОКУПАТЕЛЕЙ.

КОЦУРУ?!





...И В БЕСЩЁТЧНЫХ ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА ВСЕГДА ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ПОСТОЯННЫЙ ТОК, ХОТЯ ОН И МЕНЯЕТСЯ В КАТУШКАХ.



ЕСЛИ ЖЕ ГОВОРИТЬ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ, ТО ЕГО НАПРАВЛЕНИЕ МОЖЕТ МЕНЯТЬСЯ ДО НЕСКОЛЬКИХ ДЕСЯТКОВ РАЗ В СЕКУНДУ.



НИЧЕГО СЕБЕ! НЕСКОЛЬКО ДЕСЯТКОВ РАЗ?!

РАССМОТРИМ, НАПРИМЕР, ПАНЕЛЬ С ДВУМЯ РОЗЕТКАМИ.

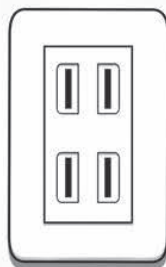


МЫ МОЖЕМ ПОДКЛЮЧИТЬ ПРОВОД ХОТЬ В ВЕРХНЮЮ РОЗЕТКУ, ХОТЬ В НИЖНЮЮ, НЕ ОБРАЩАЯ ВНИМАНИЯ И НА ТО, КАКОЙ КОНТАКТ (ПЛЮС ИЛИ МИНУС) СПРАВА, А КАКОЙ СЛЕВА, ТАК?



ДЕЙСТВИТЕЛЬНО.

ЭТО ПОТОМУ, ЧТО В РОЗЕТКУ ПОСТУПАЕТ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, ВЕЛИЧИНА И НАПРАВЛЕНИЕ КОТОРОГО ОБЫЧНО МЕНЯЮТСЯ.





ЧИСЛО, ПОКАЗЫВАЮЩЕЕ, СКОЛЬКО РАЗ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК ИЗМЕНЯЕТ СВОЁ НАПРАВЛЕНИЕ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ, НАЗЫВАЕТСЯ "ЧАСТОТОЙ".

ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЯВЛЯЕТСЯ "ГЕРЦ" (Гц).

Гц

В ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА МЕНЯЕТСЯ 50 РАЗ В СЕКУНДУ, ПОЭТОМУ ЧАСТОТА РАВНА 50 ГЦ, В ЗАПАДНОЙ ЖЕ ЯПОНИИ НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА МЕНЯЕТСЯ 60 РАЗ В СЕКУНДУ, ПОЭТОМУ ЧАСТОТА РАВНА 60 ГЦ.

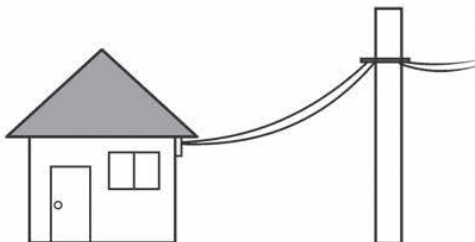
КАК ЭТО?.. ЧАСТОТА РАЗНАЯ НА ВОСТОКЕ И НА ЗАПАДЕ?

ЭТО ПРОИЗОШЛО ПОТОМУ, ЧТО В ЗАПАДНОЙ ЯПОНИИ В ПЕРИОД МЕЙДЗИ\* СТАЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ АМЕРИКАНСКОГО ОБРАЗЦА...

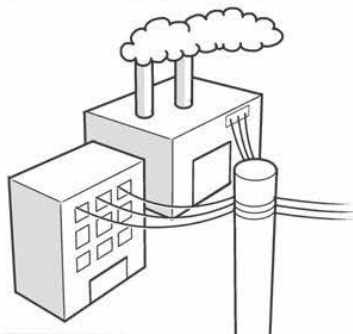


...А В ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ ИСПОЛЬЗОВАЛИ ГЕНЕРАТОРЫ НЕМЕЦКОГО ТИПА.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, ПОСТУПАЮЩИЙ ПО ДВУМ ПРОВОДАМ (ОДНА СИСТЕМА), НАЗЫВАЕТСЯ "ОДНОФАЗНЫМ", ОН ИСПОЛЬЗУЕТСЯ, НАПРИМЕР, В ЖИЛЫХ ДОМАХ.



КОГДА ЖЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ТРИ ПРОВОДА, НАПРИМЕР ДЛЯ ЗАВОДОВ ИЛИ ОФИСНЫХ ЗАДАНИЙ, ТОГДА ТОК НАЗЫВАЕТСЯ ТРЕХФАЗНЫМ.



\* Период в истории Японии с 1868 по 1912 г.



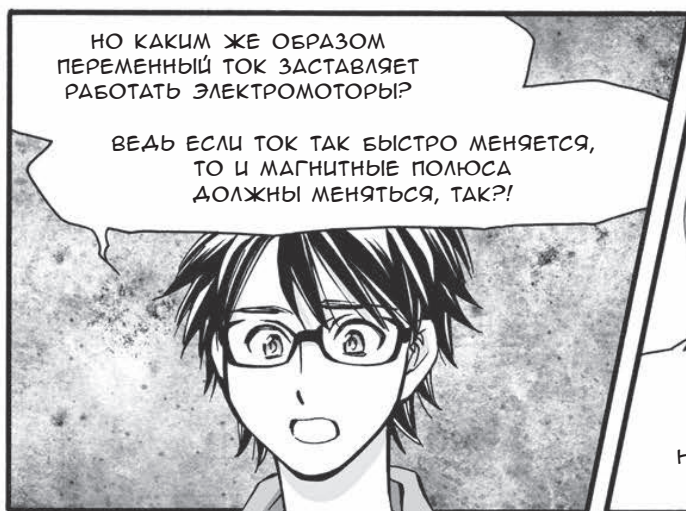
ПРАКТИЧЕСКИ ВСЁ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК,  
ЧТО МЫ ИСПОЛЬЗУЕМ  
В БЫТУ, ПЕРЕМЕННЫЙ.

ПОЭТОМУ И МЫ...



...ЕСЛИ НЕ ОБЪЕДИНИМСЯ С ЭТИМИ ЛЮДЬМИ  
И НЕ ПЕРЕМЕНИМ ВСЁ НА НАШЕЙ УЛИЦЕ,  
ВЕРОЯТНО, НЕ СМОЖЕМ ВЫЖИТЬ.

КОЩУ...



НО КАКИМ ЖЕ ОБРАЗОМ  
ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК ЗАСТАВЛЯЕТ  
РАБОТАТЬ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ?

ВЕДЬ ЕСЛИ ТОК ТАК БЫСТРО МЕНЯЕТСЯ,  
ТО И МАГНИТНЫЕ ПОЛЮСА  
ДОЛЖНЫ МЕНЯТЬСЯ, ТАК?!



ВЕРНО.

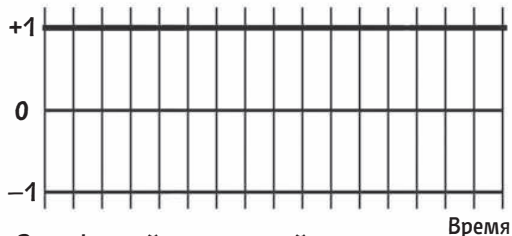
ЕСЛИ ПРОСТО ТАК ПУСТИТЬ  
ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК,  
ТО И СОЛЕНОИД  
НЕ СМОЖЕТ ВЫПОЛНЯТЬ РОЛЬ  
СТЕРЖНЕВОГО МАГНИТА.

СЕЙЧАС  
Я ОБЪЯСНЮ.

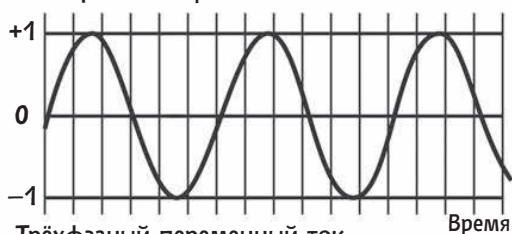
ВОТ НА ЭТИХ  
ГРАФИКАХ  
ПРЕДСТАВЛЕНЫ  
КОЛЕБАНИЯ ТОКА  
ОТ ПЛЮСА К МИНУСУ  
ДЛЯ ПОСТОЯННОГО  
ТОКА, ОДНОФАЗНОГО  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
И ТРЁХФАЗНОГО  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.



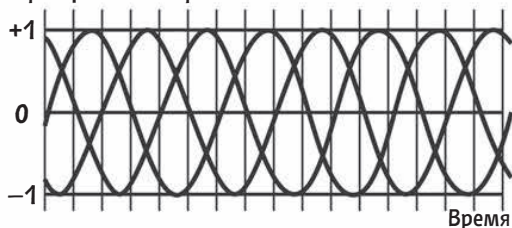
Постоянный ток



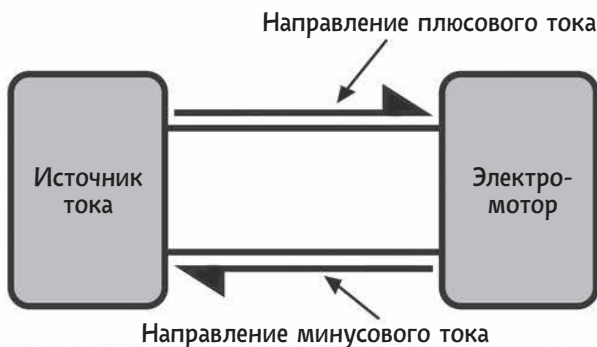
Однофазный переменный ток



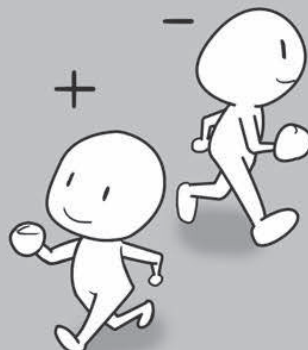
Трёхфазный переменный ток



НАПРАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ВСЕГДА ОДИНАКОВО,  
ОДНАКО КОГДА ИМЕЕМ ДВА ПРОВОДА (ФАЗЫ),  
ТО В ОДНОМ ИЗ НИХ ПОТЕЧЁТ ПЛЮСОВОЙ,  
А В ДРУГОМ МИНУСОВОЙ ТОКИ.



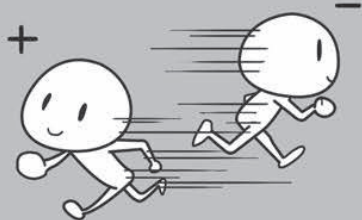
ПОЭТОМУ ЕСЛИ  
РАССМАТРИВАЕМ  
ДВА ПОТОКА...



...ТО ИХ СУММАРНЫЙ  
ТОК БУДЕТ НУЛЕВЫМ.

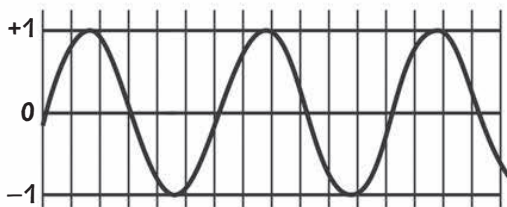


ЕСЛИ ЖЕ ОДНОФАЗНЫЙ ТОК  
ВКЛЮЧИТЬ В КАКОЙ-ТО  
МОМЕНТ ВРЕМЕНИ,  
ТО ТАКЖЕ В КАЖДОМ  
ИЗ ДВУХ ПРОВОДОВ  
СООТВЕТСТВЕННО ПОТЕКУТ  
ПЛЮСОВОЙ И МИНУСОВОЙ  
ТОКИ.



СИЛА ТОКА ХОТЯ И МЕНЯЕТСЯ С ТЕЧЕНИЕМ  
ВРЕМЕНИ, НО ОНА МЕНЯЕТСЯ ОДИНАКОВО  
В ПЛЮС И В МИНУС, ПОЭТОМУ...

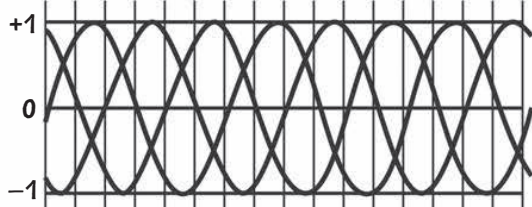
Однофазный переменный ток



...СУММАРНЫЙ ТОК ЗАДЕСЬ  
ТОЖЕ БУДЕТ РАВЕН НУЛЮ.

А ТРЁХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК  
ВЫГЛЯДИТ ОЧЕНЬ СЛОЖНО.

Трёхфазный переменный ток



ЭТО ТОЛЬКО ТАК КАЖЕТСЯ!

В КАЖДОМ ИЗ ТРЕХ ПРОВОДОВ ТЕЧЁТ  
ТОТ ЖЕ САМЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ ТОК, ПОЭТОМУ...

...И ОНИ БУДУТ МЕНЯТЬСЯ  
С ОДИНАКОВОЙ ЧАСТОТОЙ...



...СО СМЕЩЕНИЕМ  
НА 1/3 ЕДИНИЦЫ  
ВРЕМЕНИ.

И СУММАРНЫЙ ТОК  
ТРЕХ ПРОВОДОВ  
ОПЯТЬ ЖЕ БУДЕТ  
НУЛЕВЫМ.

ВСЁ-ТАКИ  
НУЛЕВЫМ.



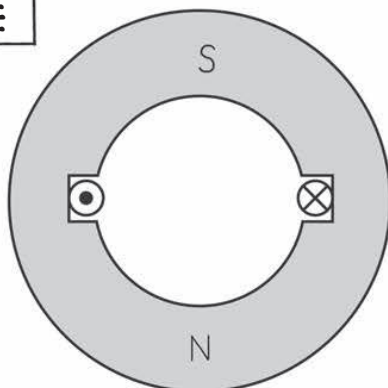
Течёт минусовой ток



Течёт 0,5 плюсового тока

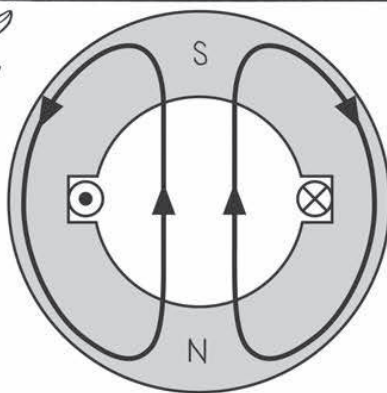
## 5.2. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ВОТ  
В ТАКОМ СТАТОРЕ  
С ОДНОЙ КАТУШКОЙ  
ОБОТКИ...

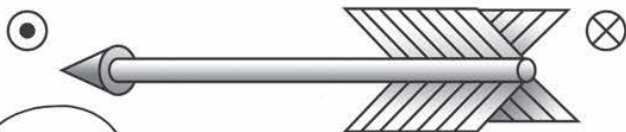


...ПРИ  
ПРОХОЖДЕНИИ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА ВОЗНИКНУТ  
ВОТ ТАКИЕ  
МАГНИТНЫЕ  
ПОЛЮСА.

ВНУТРИ СТАТОРА  
СВЕРХУ БУДЕТ ПОЛЮС S,  
А СНИЗУ ПОЛЮС N.

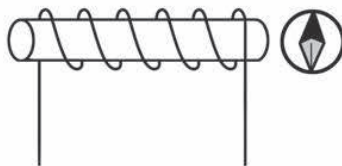


КСТАТИ, ОБОЗНАЧЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ТОКА  
⊙ и ⊗ ПРОИСХОДЯТ ОТ УСЛОВНОГО  
ИЗОБРАЖЕНИЯ НАКОНЕЧНИКА СТРЕЛЫ,  
КОГДА СТРЕЛА НАПРАВЛЕНА НА ТЕБЯ, А КРЕСТИК  
НАПОМИНАЕТ ИЗОБРАЖЕНИЕ ОПЕРЕНИЯ СТРЕЛЫ,  
ЕСЛИ СМОТРЕТЬ НА НЕЁ СЗАДИ, И ПОЭТОМУ  
ОБОЗНАЧАЕТ НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ  
В ОБРАТНУЮ СТОРОНУ.



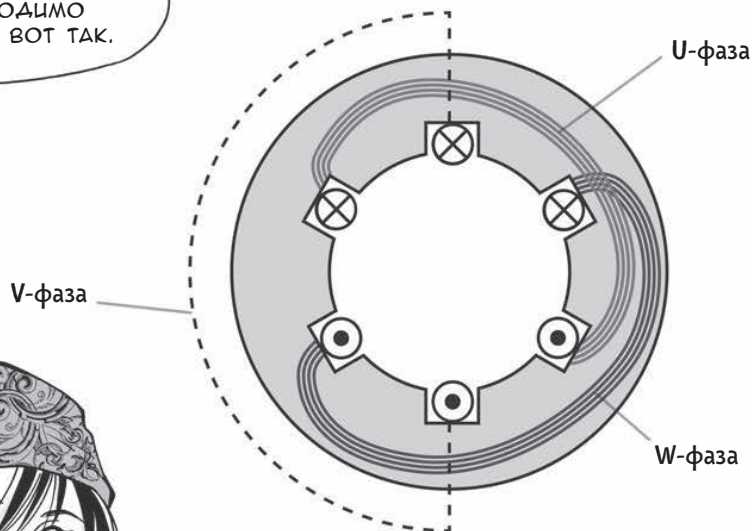
ээ...

В СЛУЧАЕ  
С ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ  
МЫ ЛЕГКО ПОЛУЧАЕМ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТ...



НО ЧТО ЖЕ БУДЕТ,  
ЕСЛИ ТОК ПЕРЕМЕННЫЙ?

В ЭТОМ СЛУЧАЕ  
НЕОБХОДИМО  
СДЕЛАТЬ ВОТ ТАК.



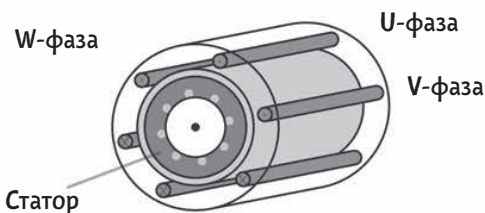
ПОНЯТНО?  
КАК ПОКАЗАНО НА ЭТОМ РИСУНКЕ, НУЖНО  
ТРИ КАТУШКИ, ТО ЕСТЬ ТРИ ФАЗЫ U, V, W.



.....!?

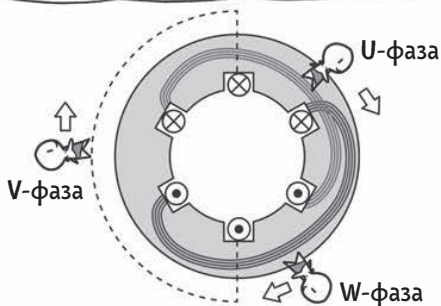


ОНИ РАСПОЛОЖЕНЫ ПО КРУГУ, ДЕЛЯ  
ЕГО НА ТРИ ЧАСТИ, ТО ЕСТЬ НА РАС-  
СТОЯНИИ В  $120^\circ$  ДРУГ ОТ ДРУГА.

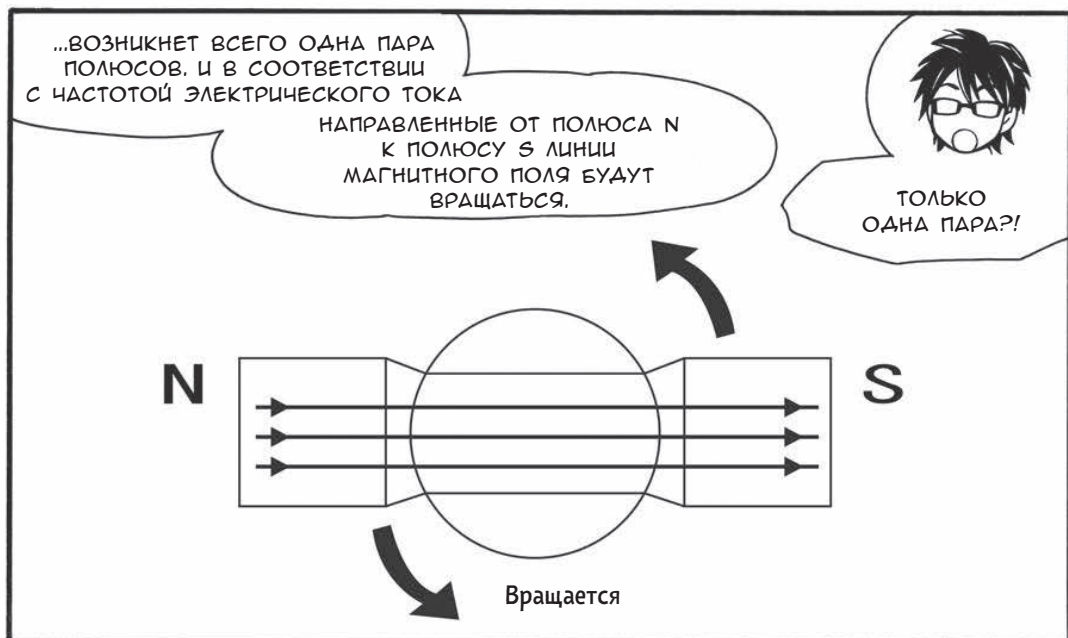


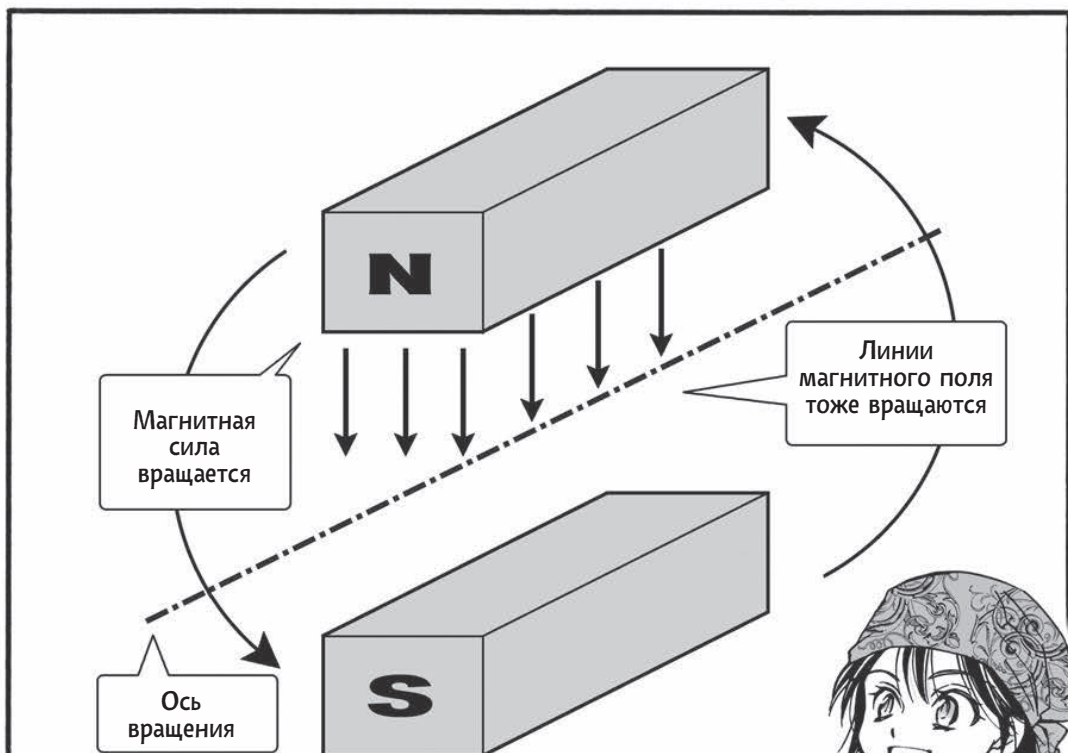
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ "ТРЕХФАЗНАЯ КАТУШКА".

ЕСЛИ ПО ТАКОЙ ТРЕХФАЗНОЙ КАТУШКЕ  
ПУСТИТЬ ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК,  
ТО...









...И ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ БУДУТ  
ВРАЩАТЬСЯ ВОКРУГ ОСИ ВРАЩЕНИЯ,  
НАХОДЯЩЕЙСЯ МЕЖДУ НИМИ.

ЧИСЛО ОБОРОТОВ  
В СЕКУНДУ БУДЕТ РАВНО  
ЧАСТОТЕ ТОКА.

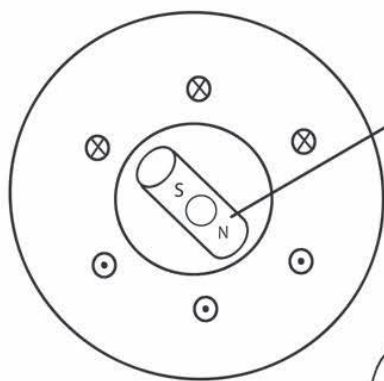
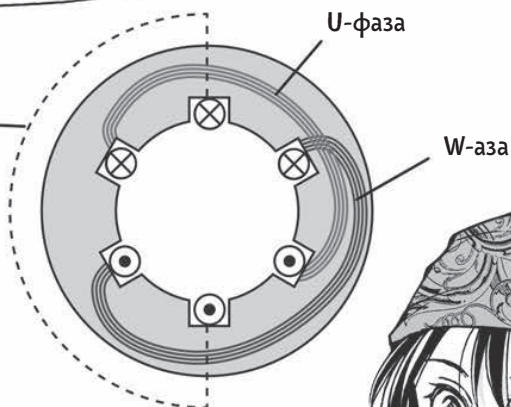


А ВОЗНИКАЮЩЕЕ ПРИ ЭТОМ  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАЗЫВАЕТСЯ  
"ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ  
ПОЛЕМ".

### 5.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО ЕСЛИ ПРИМЕНИТЬ ТРЁХФАЗНУЮ КАТУШКУ, ТО И ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВОЗНИКНЕТ СИЛА, ДА?

ДА! НАПРИМЕР, ЕСЛИ ВНУТРИ ВОТ ЭТОЙ ТРЁХФАЗНОЙ КАТУШКИ...



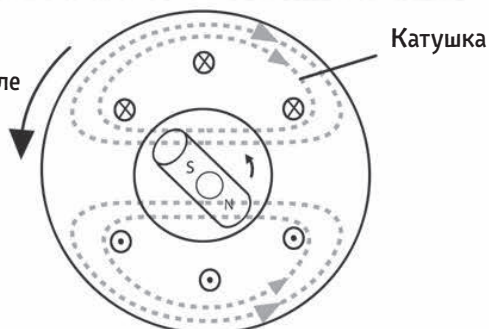
Постоянный магнит



...ВОТ ТАКИМ ОБРАЗОМ УСТАНОВИТЬ ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ...

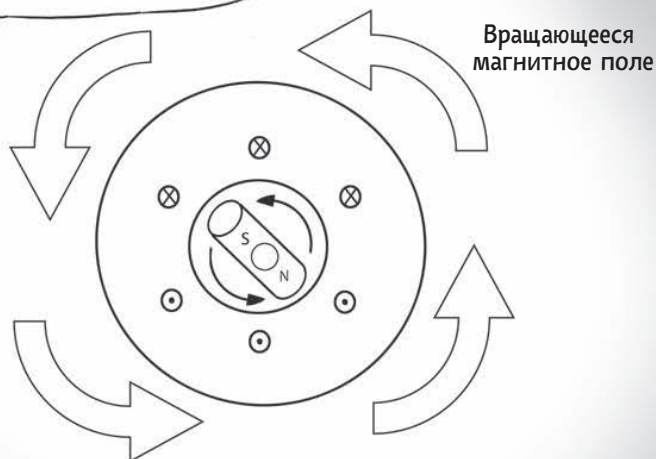
...И ПУСТИТЬ ПО ТРЁХФАЗНОЙ КАТУШКЕ ТРЁХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, ТО ВОЗНИКНЕТ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

Вращающееся магнитное поле





МАГНИТНАЯ СИЛА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОТЯНЕТ ЗА СОБОЙ  
НАХОДЯЩИЙСЯ ВНУТРИ ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ, КОТОРЫЙ ТОЖЕ СТАНЕТ ВРАЩАТЬСЯ.



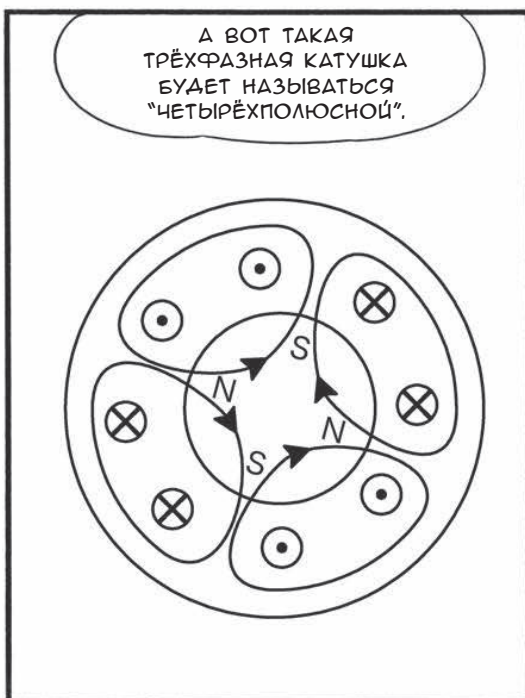
ПОСТОЯННЫЙ  
МАГНИТ БУДЕТ  
ДЕЛАТЬ СТОЛЬКО ЖЕ  
ОБОРОТОВ, ЧТО И  
ВРАЩАЮЩЕЕСЯ  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

ЭТО ЯВЛЕНИЕ  
НАЗЫВАЕТСЯ  
"СИНХРОНИЗАЦИЕЙ".

НАДО ЖЕ -  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
И МАГНИТ БУДУТ  
ВРАЩАТЬСЯ  
ВМЕСТЕ.

ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ  
ЧАСТОТА ТОКА  
И КОЛИЧЕСТВО  
ОБОРОТОВ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫ.

В ЭТОМ КАК РАЗ  
ПРИНЦИП РАБОТЫ  
ОДНОГО ИЗ ВИДОВ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОВ  
ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА...



ТАК КАК В СИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ  
КОЛИЧЕСТВО ОБОРОТОВ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНО  
ЧАСТОТЕ ТОКА,  
ТО МОЖНО  
КОНТРОЛИРОВАТЬ  
КОЛИЧЕСТВО ОБОРОТОВ,  
МЕНЯЯ ЧАСТОТУ ТОКА.

НАПРИМЕР, ЕСЛИ  
ЧАСТОТА ТОКА  
УВЕЛИЧИТСЯ  
В ДВА РАЗА...

2



...ТО И  
КОЛИЧЕСТВО ОБО-  
РОТОВ УВЕЛИЧИТСЯ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНО,  
В ДВА РАЗА!



КРОМЕ ТОГО,  
ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ  
В СИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ  
ВРАЩАЕТСЯ ПОД  
НЕКОТОРЫМ УГЛОМ  
К ЦЕНТРУ МЕЖДУ  
ПОЛЮСАМИ  
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ,...



...И ЭТА УГЛОВАЯ  
РАЗНИЦА НАЗЫВАЕТСЯ  
"РАЗНОСТЬЮ ФАЗ".

И НУЖНО, ЧТОБЫ  
ЭТА РАЗНОСТЬ ФАЗ  
БЫЛА ВСЕГДА  
В ОПРЕДЕЛЁННОМ  
ДИАПАЗОНЕ, ИНАЧЕ  
СИНХРОНИЗАЦИЯ  
НЕ ВОЗМОЖНА.



Ээ...

ЕСЛИ, НАПРИМЕР,  
ИЗ-ЗА ПОЛОМКИ МЕХАНИЗМА  
РАЗНОСТЬ ФАЗ ВДРУГ  
РЕЗКО ИЗМЕНИТСЯ...

...ТО РАБОТА МОТОРА ИЛИ ОЧЕНЬ  
ЗАМЕДЛИТСЯ, ИЛИ ОСТАНОВИТСЯ. ЭТО  
НАЗЫВАЕТСЯ "РАССИНХРОНИЗАЦИЕЙ".

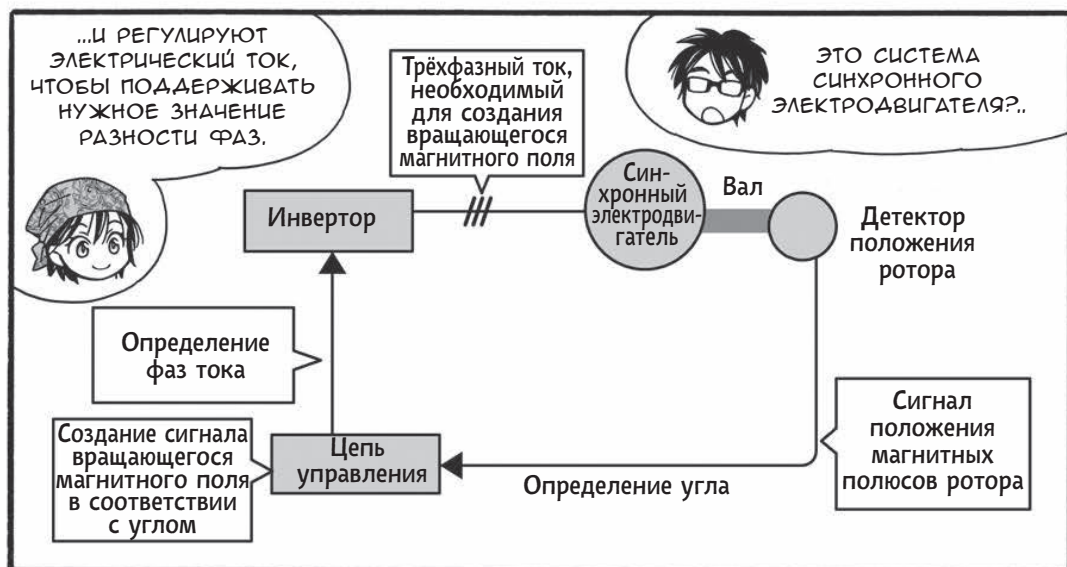


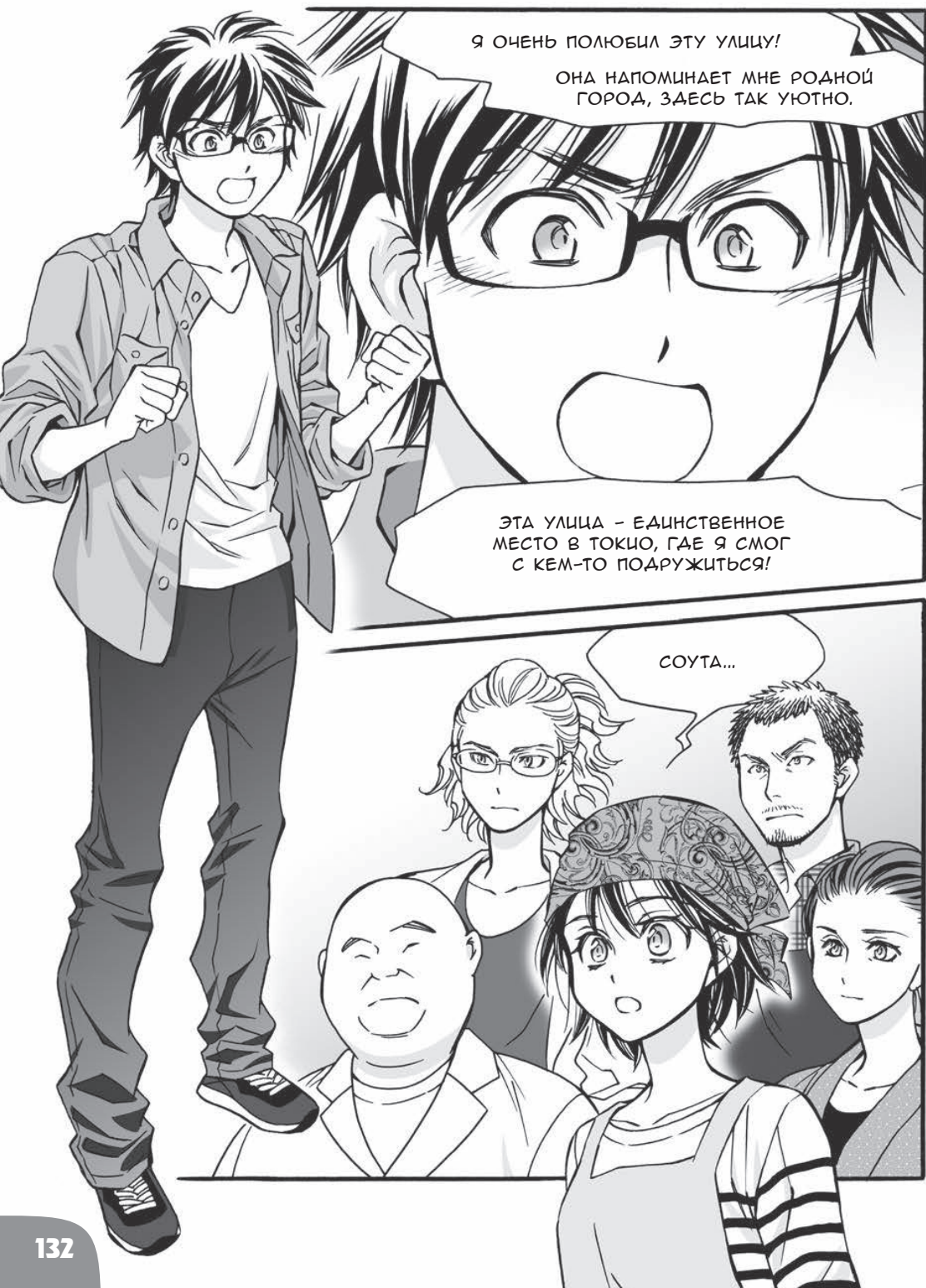
РАССИНХРОНИЗАЦИЯ?

ПОЭТОМУ  
В СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ  
С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВА  
ПОД НАЗВАНИЕМ "ИНВЕРТОР"  
ОПРЕДЕЛЯЮТ ПОЛОЖЕНИЕ  
ПОЛЮСОВ РОТОРА  
(ПОСТОЯННОГО МАГНИТА)...











ВСЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ,  
ПО СУТИ, ОДИНАКОВЫ,  
РАЗВЕ НЕТ?!

ЕСЛИ НЕТ МАГНИТА  
И КАТУШКИ, ОНИ  
НЕ БУДУТ РАБОТАТЬ.

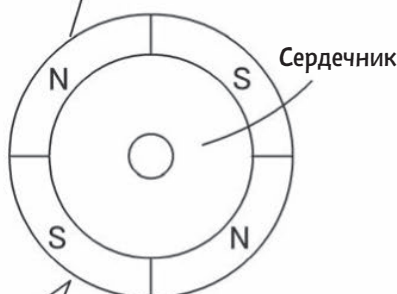
НУ... ДА...

В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
СПОСОБА РАСПОЛОЖЕНИЯ  
ПОСТОЯННОГО МАГНИТА  
В РОТОРЕ СИНХРОННОГО  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ  
НА ДВА ВИДА.



1. КОГДА ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ  
РАСПОЛОЖЕН НА ПОВЕРХНОСТИ  
СЕРДЕЧНИКА РОТОРА...

Магниты установлены  
на поверхности сердечника



Магнитное сопротив-  
ление по окружности  
постоянно

...ТАКОЙ ЭЛЕКТРОМОТОР  
НАЗЫВАЮТ ЭЛЕКТРОМОТОРОМ  
С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ (SPM).

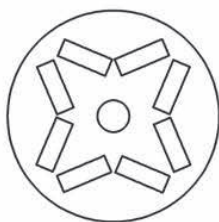
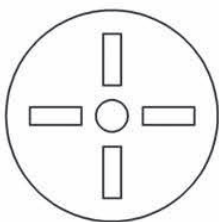
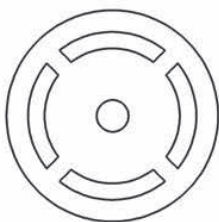
2. КОГДА ПОСТОЯННЫЙ  
МАГНИТ НАХОДИТСЯ ВНУТРИ  
СЕРДЕЧНИКА РОТОРА...



Магнитное сопротив-  
ление разное, в зави-  
симости от позиции

...ТО ЭЛЕКТРОМОТОР НАЗЫВАЮТ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОМ С ВНУТРЕННИМИ  
ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (IPM).





РАСПЛОЖЕНИЕ МАГНИТОВ В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ ИРМ  
МОЖЕТ БЫТЬ ОЧЕНЬ РАЗНЫМ.

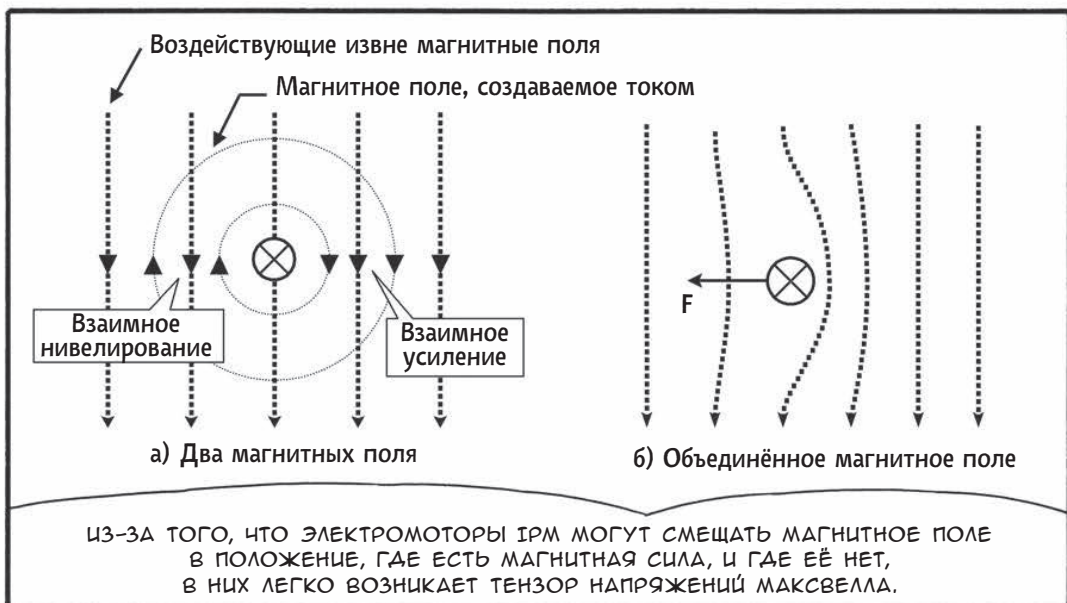
ЧТО КАСАЕТСЯ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОВ  
ЭРМ, ТО, КАК Я  
УЖЕ ОБЪЯСНЯЛА  
ПРО ПРИНЦИП  
РАБОТЫ  
СИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ,  
ТАКОЙ МОТОР  
РАБОТАЕТ БЛАГОДАРЯ  
СИЛАМ ПРИТЯЖЕНИЯ  
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
И ПОСТОЯННОГО  
МАГНИТА.

ОДНАКО ЧТО КАСАЕТСЯ  
ЭЛЕКТРОМОТОРОВ ИРМ,  
ПОСКОЛЬКУ ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ  
У НИХ НАХОДЯТСЯ ВНУТРИ РОТОРА,  
ТО ПОЯВЛЯЕТСЯ ВОЗМОЖНОСТЬ  
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЕЩЁ ОДНУ СИЛУ.

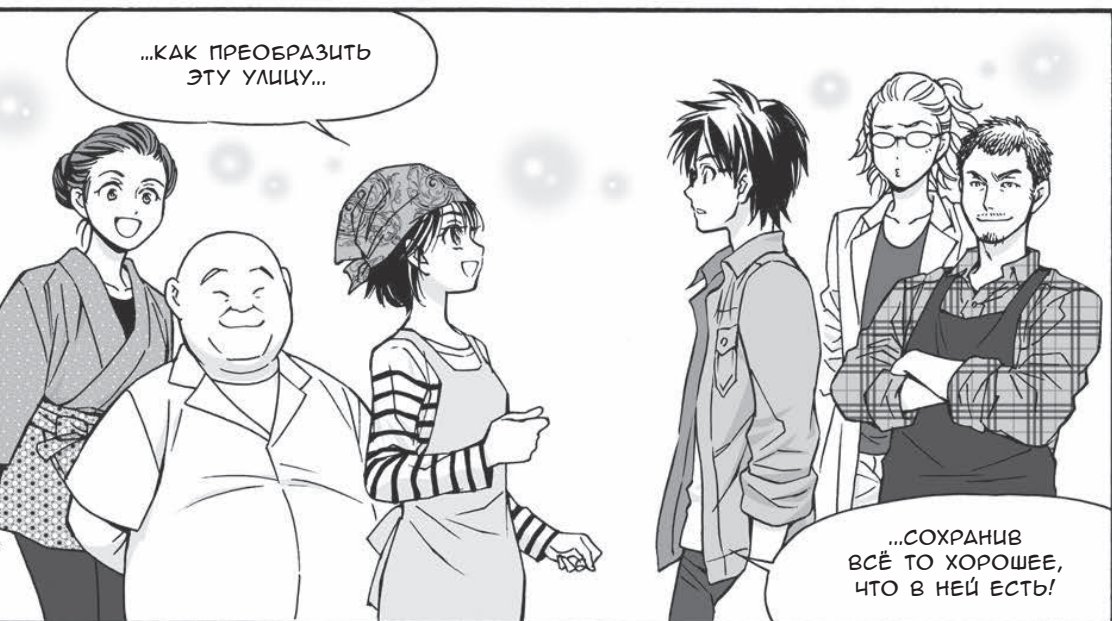
ЕЩЕ ОДНУ СИЛУ?!

ЧТО, НЕ ПОМНИШЬ?

ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ  
МАКСВЕЛЛА!









# ДОПОЛНЕНИЕ

Ранее, на примере электромоторов постоянного тока и бесщёточных электромоторов, мы рассмотрели принцип работы электромоторов, использующих постоянный ток, текущий всегда в одном направлении. Начиная с этой главы мы будем рассматривать электромоторы, работающие от переменного тока. Переменный ток – это ток, в котором плюс и минус постоянно меняются местами. Электромоторы, работающие от переменного тока, так и называются электромоторами переменного тока. Рассмотрим подробнее один из видов таких электромоторов – синхронный электромотор.



## ЧТО ТАКОЕ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

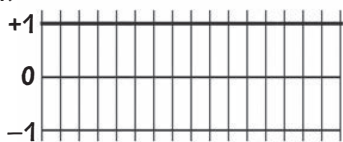
Ключевым моментом при использовании электричества является наличие двух проводов. И аккумуляторные батареи, и бытовые розетки подключаются с помощью двух электрических проводов. Ток, поступающий от аккумуляторных батарей, является постоянным. Постоянный ток в аккумуляторной батарее течёт от плюса к минусу, поэтому при подключении аккумуляторной батареи необходимо чётко понимать, где плюсовой, а где минусовой контакты.

Однако бытовыми розетками мы можем пользоваться, не обращая внимания на то, где у них плюс, а где минус. Это потому, что в розетки поступает переменный ток. Переменный ток – это электрический ток, направление и величина которого меняются с течением времени. Количество раз, которое переменный ток меняет своё направление за единицу времени, характеризуется величиной, называемой частотой. Единицей измерения частоты тока являются герцы (Гц). В восточной Японии направление переменного тока меняется 50 раз в секунду (50 Гц), а в западной Японии – 60 раз в секунду (60 Гц). И потому, что направление переменного тока так часто меняется, нам нет необходимости определять, где у него плюс, а где минус. Величина же тока меняется по синусоиде.

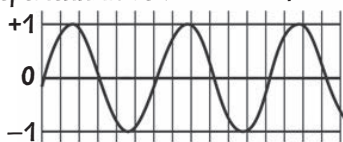
Кроме того, например, на заводах и в офисных зданиях переменный ток подключается с использованием трех электрических проводов. Такой ток называется трёхфазным переменным током. В противоположность трёхфазному переменному току переменный ток в жилых домах называется однофазным.

На рис. 5.1 сравниваются постоянный ток, однофазный переменный и трёхфазный переменный токи. При использовании постоянного тока по одному из проводов всегда течёт плюсовой ток, а по другому – минусовой, поэтому направление тока всегда одинаково. И поскольку по двум проводам идёт разнонаправленный ток, суммарный ток будет равен нулю.

### Постоянный ток



### Однофазный переменный ток



### Трёхфазный переменный ток

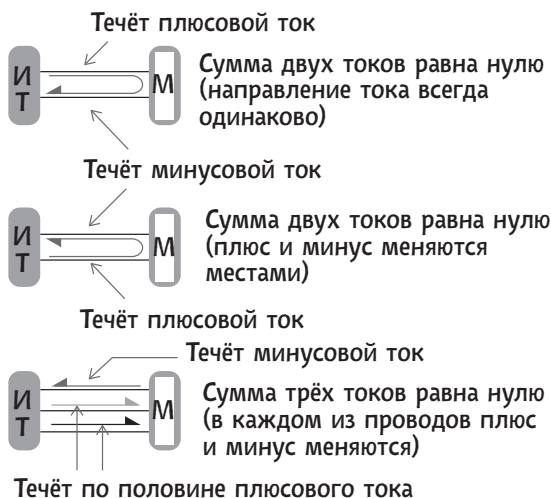
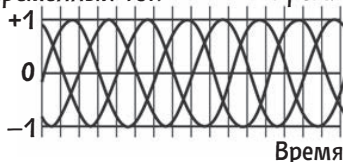


Рисунок 5.1. Постоянный, однофазный переменный и трёхфазный переменный токи

Если рассматривать однофазный переменный ток в какой-то конкретный момент времени, то всегда в одном направлении будет течь плюсовой ток, а в другом – минусовой. Величина же тока меняется по синусоиде, но плюсовой и минусовой токи будут меняться одинаково. Следовательно, и в этом случае суммарный ток будет нулевым.

В случае же трёхфазного тока в каждом из трех проводов течёт тот же самый однофазный ток. Каждый из электрических проводов называется фазой. Частота тока во всех фазах будет одинаковой. Но направление тока на каждой фазе меняется. Кроме того, изменения тока на каждой из фаз будут происходить с разницей на  $1/3$  единицы времени относительно изменений на какой-либо другой фазе. По этой причине суммарный ток трёхфазного переменного тока тоже будет равен нулю. Электромоторы переменного тока используют именно такой трёхфазный переменный ток.

Примечание: ИТ – источник тока, М – электромотор.



## ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК И ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Направление переменного тока постоянно меняется. Следовательно, если переменный ток пустить по такому соленоиду, какой мы рассматривали в главе 2, то появляющиеся на обоих концах соленоида магнитные полюса N и S тоже будут постоянно меняться местами в соответствии с направлением тока. Когда через соленоид проходит постоянный ток, то он становится подобен магниту цилиндрической формы с магнитными полюсами, в случае же с переменным током такого не будет.

По этой причине в электромоторах переменного тока используют особого вида обмотку катушек. Вид статора с одной катушкой изображён на рис. 5.2. Если по такой катушке пустить постоянный ток, то, как показано на рисунке, внутри статора сверху возникнет магнитный полюс S, а снизу – магнитный полюс N. В этом случае можно считать, что возникает магнит с магнитными полюсами внутри статора. А теперь пустим через эту же катушку однофазный переменный ток. Направление тока теперь будет меняться с частотой тока. Следовательно, и полюса N и S будут меняться с частотой тока.

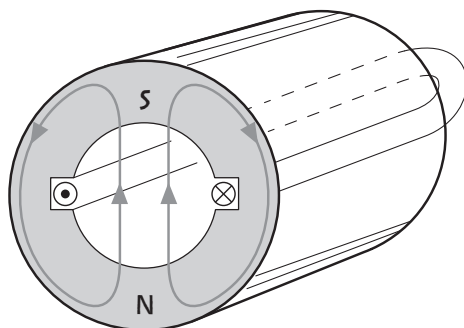


Рисунок 5.2. Однофазная катушка

Теперь рассмотрим ситуацию с тремя катушками, как это изображено на рис. 5.3. Катушки располагаются по кругу на расстоянии  $120^\circ$  друг от друга. Такая обмотка называется трёхфазной катушкой. На рис. 5.3 фазы обозначены буквами U, V и W. Теперь по такой трёхфазной катушке пустим трёхфазный переменный ток. В этом случае возникнет одна пара магнитных полюсов N и S, как показано на рис. 5.4, которые будут вращаться в соответствии с частотой тока. То есть внутри трёхфазной катушки будут вращаться силовые линии магнитного поля, направленные от полюса N к полюсу S.



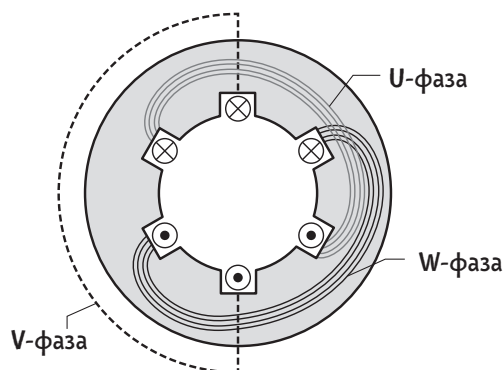


Рисунок 5.3. Трёхфазная катушка

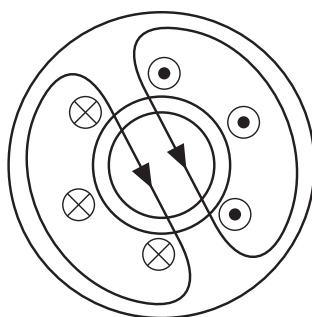


Рисунок 5.4. Магнитные полюса, создаваемые трёхфазным переменным током

Это аналогично вращению магнитов вокруг оси вращения, условно проходящей через центр между полюсами N и S постоянных магнитов, как это изображено на рис. 5.5. Количество оборотов магнитного поля в секунду будет равно частоте тока. Такое магнитное поле называют вращающимся магнитным полем.

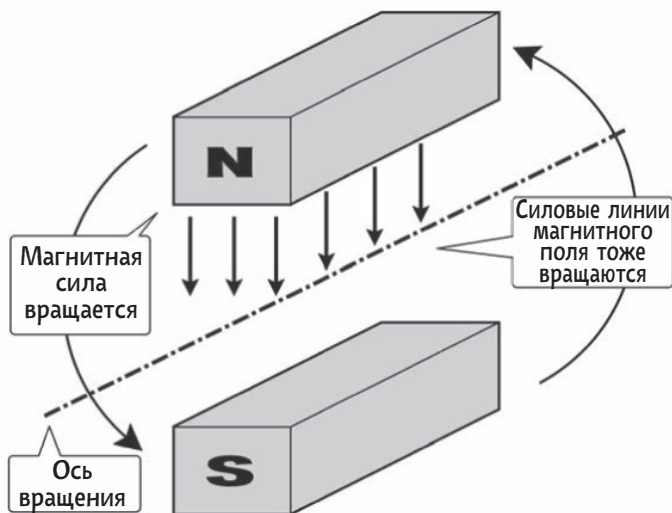


Рисунок 5.5. Вращающееся магнитное поле

Теперь объясним причины вращения магнитного поля, используя формулы. Три фазы катушки расположены на расстоянии  $120^\circ$  друг от друга, что соответствует  $2\pi/3$  радиан. Теперь попробуем выразить в виде формулы плотность магнитного потока для определённого положения каждой фазы обмотки. Рассмотрим плотность магнитного потока в положении  $\theta$ . Тогда плотность магнитного потока каждой фазы катушки можно выразить формулами

$$B_u = B_0 \sin \theta,$$

$$B_v = B_0 \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$B_w = B_0 \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Эти формулы отличаются только выражением под знаком синуса, показывающим, что три фазы катушки расположены друг от друга на расстоянии  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  рад). Это означает, что и магнитные поля, образованные проходящим через катушку электрическим током, расположены друг от друга на расстоянии  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  рад). Таким образом, плотность магнитного потока в положении  $\theta$  определяется положением каждой фазы катушки.

С другой стороны, плотность магнитного потока каждой фазы катушки возникает благодаря проходящему через каждую фазу электрическому току. Проходящий через фазы катушки трёхфазный переменный ток можно выразить следующими формулами:

$$i_u = I_m \cos \omega t;$$

$$i_v = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3});$$

$$i_w = I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}).$$

Эти формулы различаются выражением под знаком косинуса, показывающим, что проходящий через каждую из фаз катушки трёхфазный переменный ток будет смещённым относительно друг друга на  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  рад). Разность в положении токов с одинаковой частотой относительно времени называют сдвигом фаз. При использовании трёхфазного переменного тока ток, проходящий в определённый момент времени через каждую из фаз катушки, будет разным по величине и по направлению.

Положения фаз катушки расположены на расстоянии в  $120^\circ$  друг от друга. Так как фаза тока, проходящего через каждую из фаз катушки, различна, то плотность магнитного потока, сгенерированного каждой из фаз катушки в положении  $\theta$ , можно выразить следующим образом:

$$B_u = B_m \cos \omega t \cdot \sin \theta;$$

$$B_v = B_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi);$$

$$B_w = B_m \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \sin(\theta - \frac{4}{3}\pi).$$

Плотность магнитного потока, сгенерированного каждой из фаз катушки, меняется не только в зависимости от положения  $\theta$ , но и от времени  $t$ .

Реальная плотность магнитного потока  $B$  в положении  $\theta$  является комбинацией этих трех плотностей магнитных потоков, то есть суммой указанных выше формул. Таким образом, вот что мы получим в итоге<sup>6</sup>:

$$B = B_u + B_v + B_w = \frac{3}{2} B_m \sin(\theta - \omega t).$$

<sup>6</sup> Попробуйте самостоятельно вывести эту формулу, используя разные свойства тригонометрических функций.



Результат вычисления будет меняться в зависимости от положения  $\theta$  и времени  $t$ . Эта формула показывает, что величина магнитного потока, порождаемого трёхфазной катушкой, в 1,5 раза больше, чем плотность магнитного потока каждой из фаз катушки. Кроме того, угловая скорость вращения магнитного потока будет равна  $\omega$ . Другими словами, если через трёхфазную катушку пустить трёхфазный переменный ток, то получим подобие внешних вращающихся постоянных магнитов N и S, как показано на рис. 5.5.



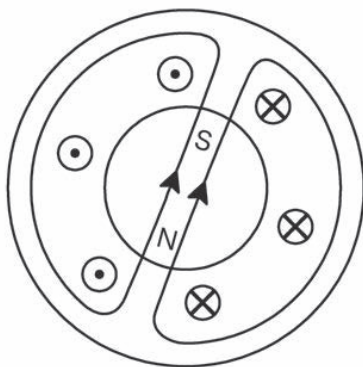
## ПОЧЕМУ ВРАЩАЕТСЯ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ?

А теперь к находящемуся внутри трёхфазной катушки валу прикрепим постоянный магнит. Когда по трёхфазной катушке проходит трёхфазный переменный ток, возникает вращающееся магнитное поле. И тогда находящийся внутри постоянный магнит потянет за собой магнитная сила вращающегося магнитного поля. Таким образом, постоянный магнит тоже станет вращаться вслед за вращающимся магнитным полем. Количество оборотов постоянного магнита будет совпадать с количеством оборотов вращающегося магнитного поля. Такое совпадение количества оборотов называется синхронизацией. Это является принципом работы синхронных электромоторов.

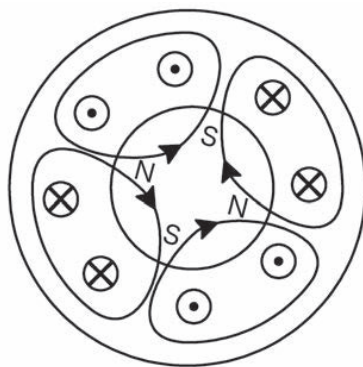
При синхронизации отношение количества оборотов в минуту  $N_0$  [мин<sup>-1</sup>] и частоты тока  $f$  [Гц] выражается формулой

$$N_0 = \frac{120}{P} [\text{мин}^{-1}].$$

где  $P$  – количество полюсов в трёхфазной катушке. Например, в изображенной на рис. 5.3 трёхфазной катушке вращающееся магнитное поле вращает два магнитных полюса N и S. Такая катушка называется двухполюсной. В этом случае  $P = 2$ . Примеры двухполюсной и четырёхполюсной трёхфазных катушек изображены на рис. 5.6.



Двухполюсная трёхфазная катушка

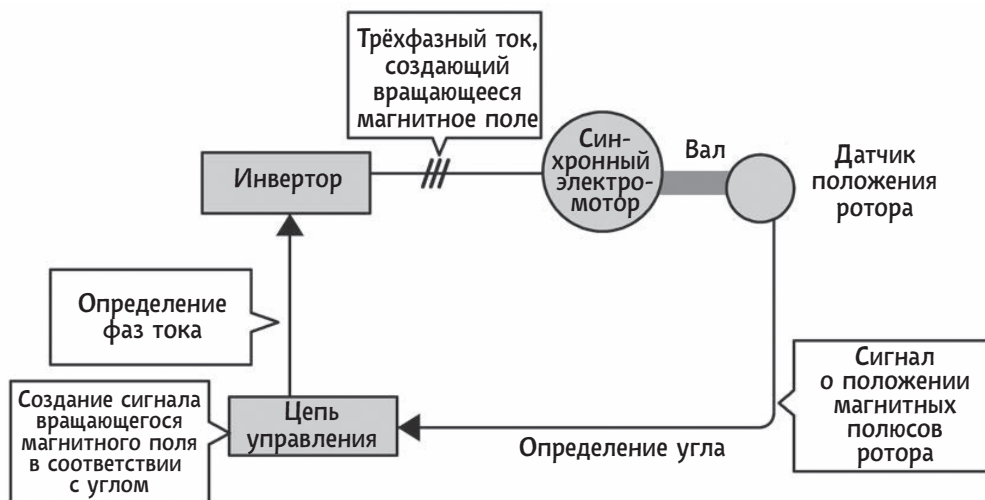


Четырёхполюсная трёхфазная катушка

Рисунок 5.6. Количество полюсов

В синхронных электромоторах количество оборотов пропорционально частоте тока. Поэтому, регулируя частоту тока, можно управлять скоростью вращения вала мотора. Хотя ротор синхронного электромотора синхронно вращается, но вращается он под определенным углом к центру между магнитными полюсами вращающегося магнитного поля. Эта угловая разница называется разностью фаз<sup>7</sup>. В синхронных электромоторах разность фаз всегда должна быть в определенном диапазоне, иначе синхронизация нарушится. Если состояние механизма, работающего от электромотора, резко изменится, то вслед за этим резко изменится и разность фаз вращающегося магнитного поля. Из-за этого сильно снизится момент силы, а значит, и работа электромотора или значительно замедлится, или он остановится. Такое явление называется рассинхронизацией.

Чтобы предотвратить рассинхронизацию в синхронных электромоторах, так же, как и в бесщёточных моторах, необходимо определять месторасположение магнитного полюса ротора. Ток же регулируют таким образом, чтобы получить нужное значение разности фаз между вращающимся магнитным полем и вращающимся магнитом ротора, возникающей из-за проходящего через статор переменного тока. В отличие от бесщёточных электромоторов, здесь мы имеем дело с трёхфазным переменным током, изменяющимся по синусоиде. В этом случае не достаточно просто менять полярность тока, а необходимо точно регулировать отношения между магнитными полюсами и вращающимся магнитным полем. Поэтому и используемый в бесщёточных электромоторах простой датчик, определяющий только положение полюсов N и S, синхронным электромоторам не подойдёт. Здесь требуется высокоточный датчик положения ротора. Кроме того, для регулировки синусоидального тока используется инвертор, который вместе с датчиком положения ротора образует единую систему функционирования синхронного электромотора с постоянными магнитами.



**Рисунок 5.7. Система функционирования синхронного электромотора с постоянными магнитами**

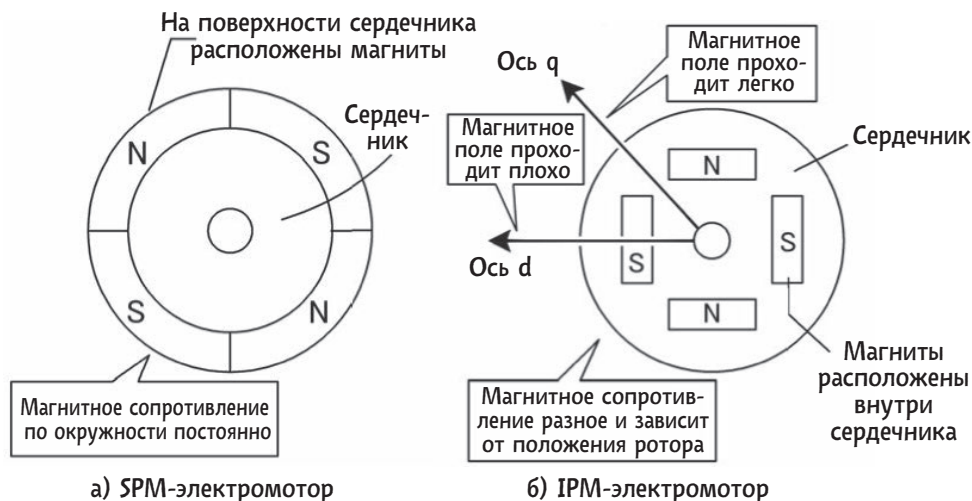
<sup>7</sup> Разность фаз при одинаковом количестве оборотов подобна расстоянию между двумя объектами, движущимися с одинаковой скоростью.



## УСТРОЙСТВО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В синхронных электромоторах с постоянными магнитами магниты устанавливаются на роторе. По способу расположения постоянных магнитов на роторе электродвигателя делятся на два вида: электродвигатели с поверхностными постоянными магнитами (SPM-электромоторы)<sup>8</sup> и электродвигатели с внутренними постоянными магнитами (IPM-электромоторы)<sup>9</sup>.

На рис. 5.8, а представлен SPM-электромотор, в котором постоянный магнит расположен на поверхности сердечника ротора. На рис. 5.8, б представлен IPM-электромотор, в котором постоянный магнит расположен внутри сердечника ротора. Существуют разные способы установки постоянных магнитов внутри ротора IPM-электромоторов, как это показано на стр. 134.



**Рисунок 5.8. Устройство роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами**

Принцип работы SPM-электродвигателей такой же, как уже рассмотренный общий принцип работы синхронных электромоторов. Такой мотор работает только благодаря силам притяжения вращающегося магнитного поля и постоянного магнита. Однако в IPM-электромоторах появляется возможность использовать ещё одну силу. Возможность прохождения магнитного поля (магнитная проницаемость<sup>10</sup>) через материал сердечника и магниты разная. Магнитная проницаемость материала сердечника высокая, поэтому магнитное поле проходит через него легко. Поэтому из-за расположенных внутри сердечника магнитов силовые линии магнитного поля не будут идти прямо, а будут отклоняться подобно тому, как это изображено на рис. 5.9. В этом случае возникнет тензор напряжений Максвелла, о котором шла речь в главе 2. Это сила, которая не может появиться в SPM-электромоторах с поверхностными магнитами. Таким образом, эффективность IPM-электромоторов, по сравнению с SPM-электромоторами, будет выше.

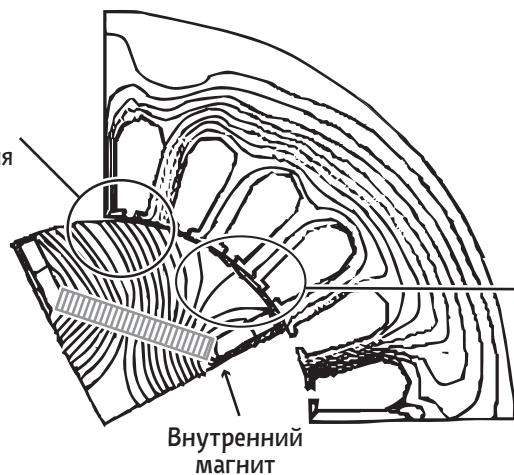
<sup>8</sup> SPM (Surface Permanent Magnet) – поверхностный магнит.

<sup>9</sup> IPM (Interior Permanent Magnet) – внутренний магнит.

<sup>10</sup> Магнитная проницаемость магнитов почти такая же, как у воздуха, а магнитная проницаемость материала сердечника (электротехнической стали) примерно в 5000...10000 раз выше.



Плотный поток силовых линий магнитного поля



Силовые линии магнитного поля проходят плохо

Рисунок 5.9. Отклонение силовых линий магнитного поля в IPM-электродвигателе

Когда возникает необходимость описать свойства катушки, используют понятие «индуктивность». Определение индуктивности можно получить из формулы

$$\varphi = L I.$$

Индуктивность – это коэффициент пропорциональности силы тока  $I$  и магнитного потока  $\varphi$ , создаваемого этим током. С другой стороны, в электрических цепях индуктивность используется следующим образом:

$$v = L \frac{di}{dt}.$$

В этой формуле индуктивность выражает величину электродвижущей силы (ЭДС) индукции  $v$ , вызванной изменением силы тока с течением времени.

Изменение тока в цепи означает изменение магнитного поля катушки. А когда меняется магнитное поле, то из-за электромагнитной индукции возникает ЭДС индукции. Другими словами, изменение силы тока ведёт к изменению электрического напряжения.

Когда ток проходит через катушку индуктивности в цепи, то магнитная энергия  $U$  накапливается в катушке индуктивности:

$$U = \frac{1}{2} L I^2$$

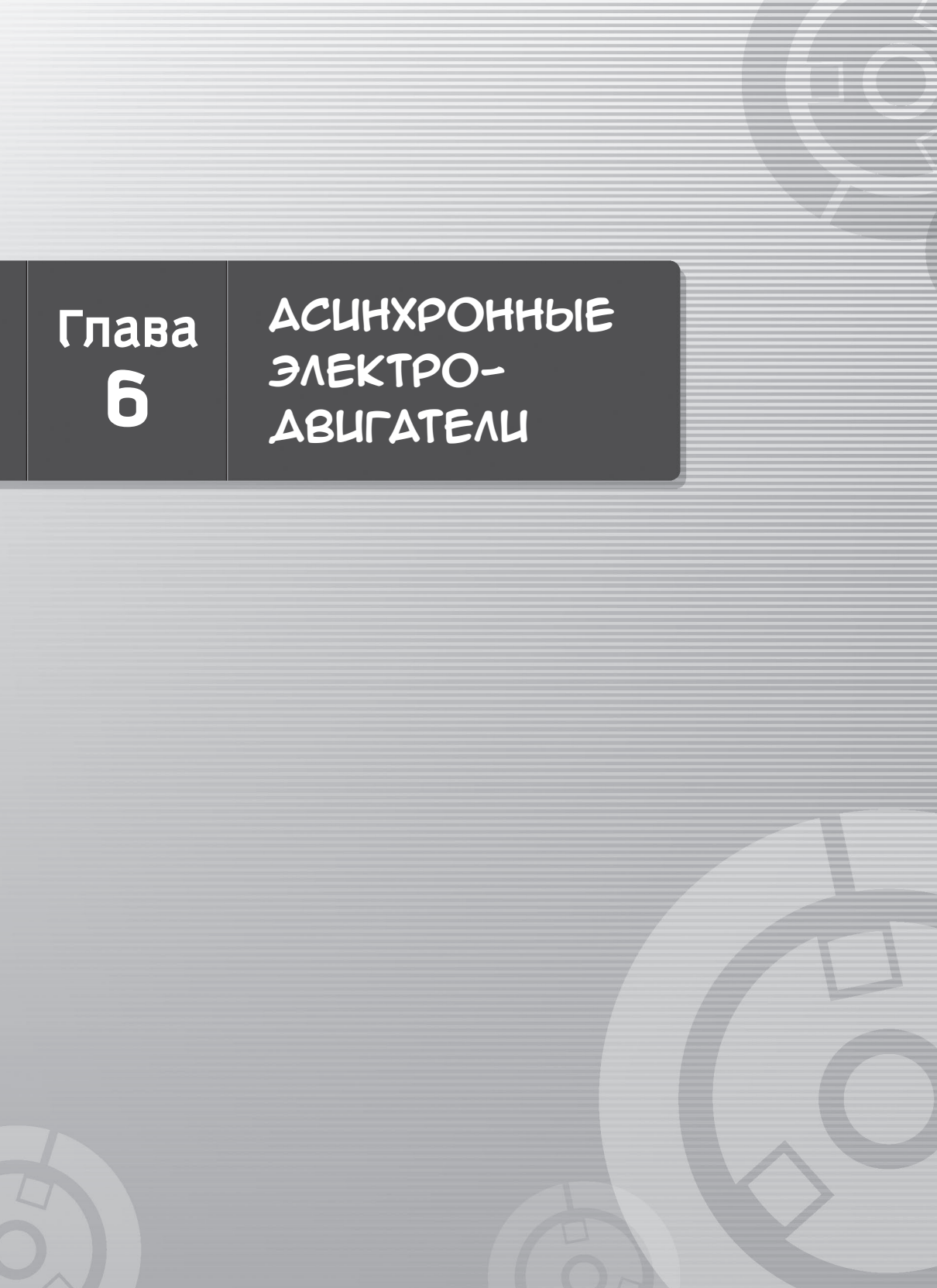
Накапливая или освобождая эту энергию, индуктивность может выполнять функцию контроля за изменениями тока.





# Глава 6

## АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛИ



## 6.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



РЕШИМОСТЬ!  
ЭНТУЗИАЗМ!  
ИСКРЕННОСТЬ!

В ЭТОМ НАША СИЛА!  
И ЭТА СИЛА НЕПРЕМЕННО  
ПРИВЛЕЧЁТ НА НАШУ УЛИЦУ  
НОВЫХ ГОСТЕЙ!

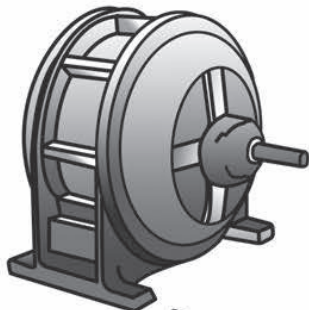
КОУРУ.

ГОСПОДИН КАНЭМАРУ,  
А ВЫ ЗНАЕТЕ, ЧТО ТАКОЕ  
АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ?!

АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ?!  
НУ, ДА.

ЭТО РАЗНОВИДНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОТОРОВ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ВЕРНО? ОНИ, КАК И  
СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ, РАБОТАЮТ  
ОТ ТРЁХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

ДА! НО...  
АСИНХРОННЫЕ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ,  
В ОТЛИЧИЕ  
ОТ СИНХРОННЫХ,  
НЕ ИСПОЛЗУЮТ  
ПОСТОЯННЫЙ  
МАГНИТ!





ПОЭТОМУ ДО ТОГО, КАК РАСПРОСТРАНИЛИСЬ  
СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ,  
ПОЧТИ ВО ВСЕХ КРУПНЫХ МЕХАНИЗМАХ  
ИСПОЛЬЗОВАЛИСЬ АСИНХРОННЫЕ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ.



ЭЭ... ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА БЕЗ МАГНИТА?

НО КАК ЖЕ БЕЗ МАГНИТА  
ПОЛУЧАЕТСЯ ЭНЕРГИЯ?



АГА! ТУТ ДЕЛО В ТОМ,  
ЧТО АСИНХРОННЫЕ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ...

...ВЫРАБАТЫВАЮТ ЭНЕРГИЮ,  
ЗАСТАВЛЯЯ ВРАЩАТЬСЯ  
"ДИСК АРАГО"!



А? ДИСК АРАГО?!

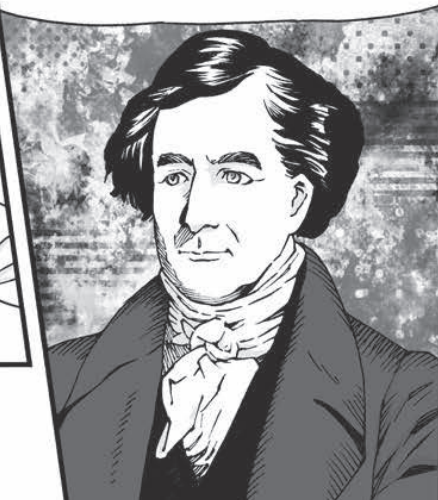
**ШУР**

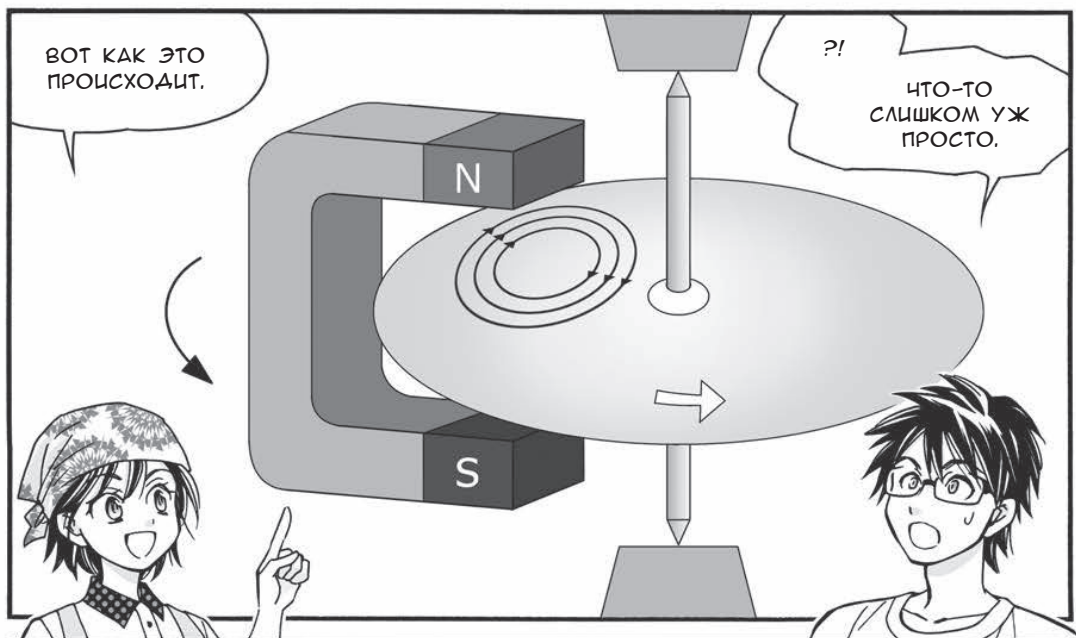
ВОТ ОН!

ОГО!

ЭТА ШТУКА?!

ЭТО ЯВЛЕНИЕ ОТКРЫЛ  
ФРАНЦУЗСКИЙ ФИЗИК  
ФРАНСУА АРАГО.





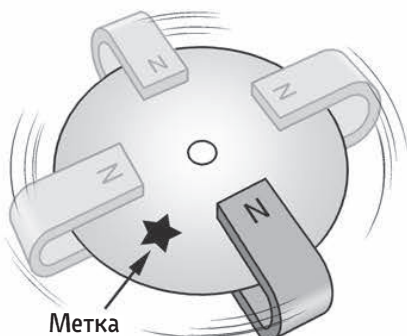


НО НА САМОМ-ТО  
ДЕЛЕ МАГНИТЫ  
НАЧИНАЮТ  
ВРАЩАТЬСЯ  
ВПЕРЕД ДИСКА!

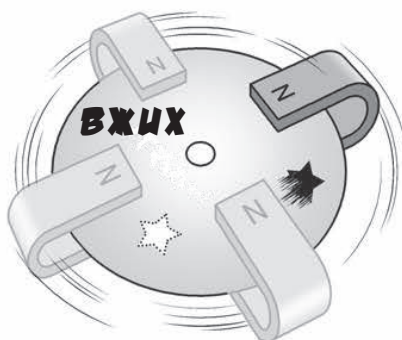


МАГНИТЫ НАЧИНАЮТ  
ВРАЩАТЬСЯ?

ЕСЛИ РЯДОМ С ДИСКОМ  
НАЧНУТ ВРАЩАТЬСЯ  
МАГНИТЫ, ТО...



...БУДАТО СЛЕДУЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ  
МАГНИТОВ, ДИСК ТОЖЕ НАЧНЁТ  
ВРАЩАТЬСЯ!



ЧТО?  
НО ПОЧЕМУ?  
ПОЧЕМУ ЖЕ?  
ПОЧЕМУ?



ЭТО ПОТОМУ,  
ЧТО...



...ВОЗНИКАЕТ  
ЭЛЕКТРОВЫЖУЩАЯ СИЛА  
ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ!



ЭЛЕКТРОВЫЖУЩАЯ СИЛА  
ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ?





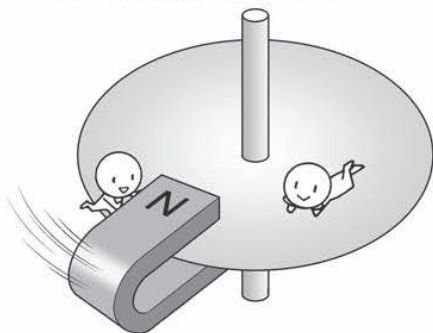
ЕСЛИ ПРОВОДНИК  
ВРАЩАЕТСЯ  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ,  
ТО ПРОПОРЦИОНАЛЬНО  
СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ...

...ВЫРАБАТЫВАЕТСЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО!

ВОТ ЭТО, ПОМНИШЬ?!  
МЫ ГОВОРИЛИ  
ОБ ЭТОМ РАНЬШЕ!

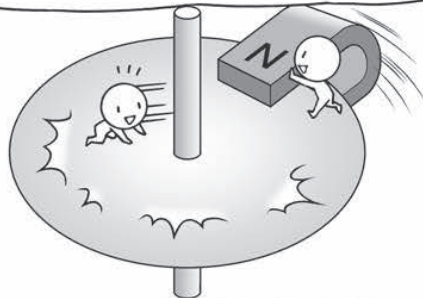
А, ЭТО!

НО В СЛУЧАЕ С ДИСКОМ АРАГО  
ВРАЩАЮТСЯ МАГНИТЫ.



ВЫСТУПАЮЩИЙ В КАЧЕСТВЕ ПРОВОДНИКА  
ДИСК СНАЧАЛА НЕ ДВИЖЕТСЯ.

НО ЭТО ПОХОЖЕ НА СИТУАЦИЮ,  
КОГДА ДВИЖЕТСЯ ПРОВОДНИК,  
А МАГНИТ СТОИТ НА МЕСТЕ.



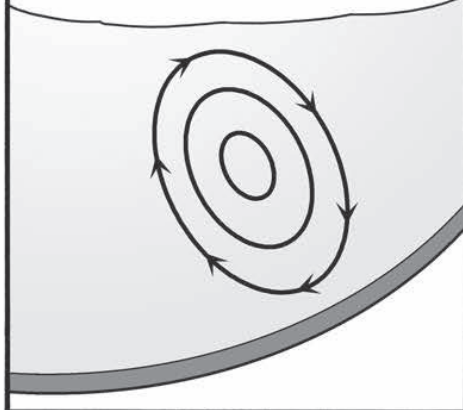
ПОЭТОМУ ПРИ ДВИЖЕНИИ МАГНИТА  
ВНУТРИ ДИСКА АРАГО ВОЗНИКНЕТ  
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА, КАК  
ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

НО В ЭТОТ РАЗ ПРОВОДНИКОМ  
У НАС ЯВЛЯЕТСЯ НЕ СТЕРЖЕНЬ  
ИЛИ ПРОВОД, А ДИСК.



И В ЭТОМ  
СЛУЧАЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО...

...БУДЕТ ОБРАЗОВЫВАТЬСЯ  
ВНУТРИ ДИСКА  
ВИХРЕВЫЕ ПОТОКИ!



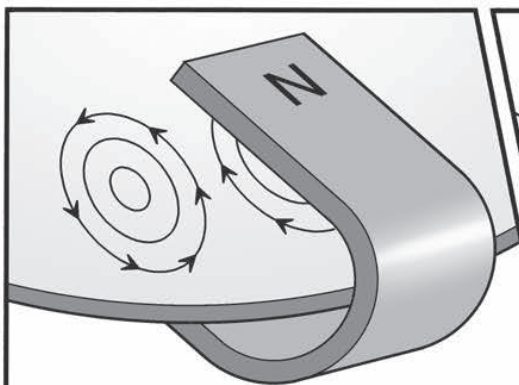
И ПОЭТОМУ  
НАЗЫВАЮТ ТАКОЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
"ВИХРЕВОЙ ТОК".



Ээ...



.....!  
ЭТИ ДВОЕ ТОЛЬКО  
ДРУГ С ДРУГОМ  
ГОВОРЯТ.



ВИХРЕВЫЕ ТОКИ ВНУТРИ  
И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАРУЖНОГО  
МАГНИТА СОЗДАЮТ В ДИСКЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СИЛУ.

ЯВЛЕНИЕ, ВЫЗЫВАЮЩЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЕ  
ЭДС ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, НАЗЫВАЕТСЯ  
"ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИЕЙ".



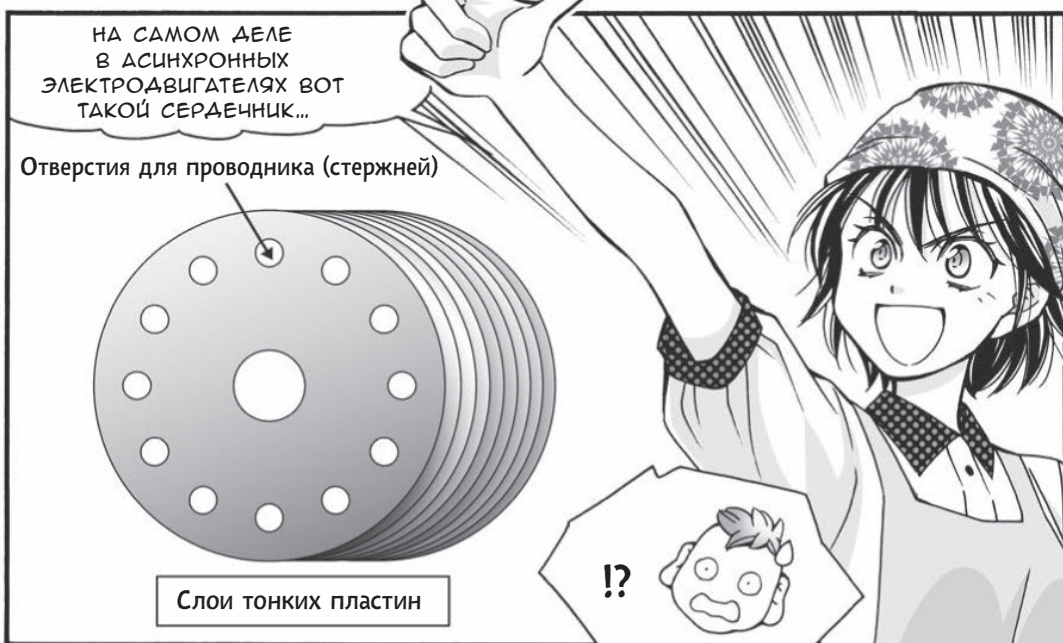
РАБОТАЮЩИЕ БЛАГОДАРЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ НАЗЫВАЮТ  
"ИНДУКЦИОННЫМИ", ИЛИ  
"АСИНХРОННЫМИ".



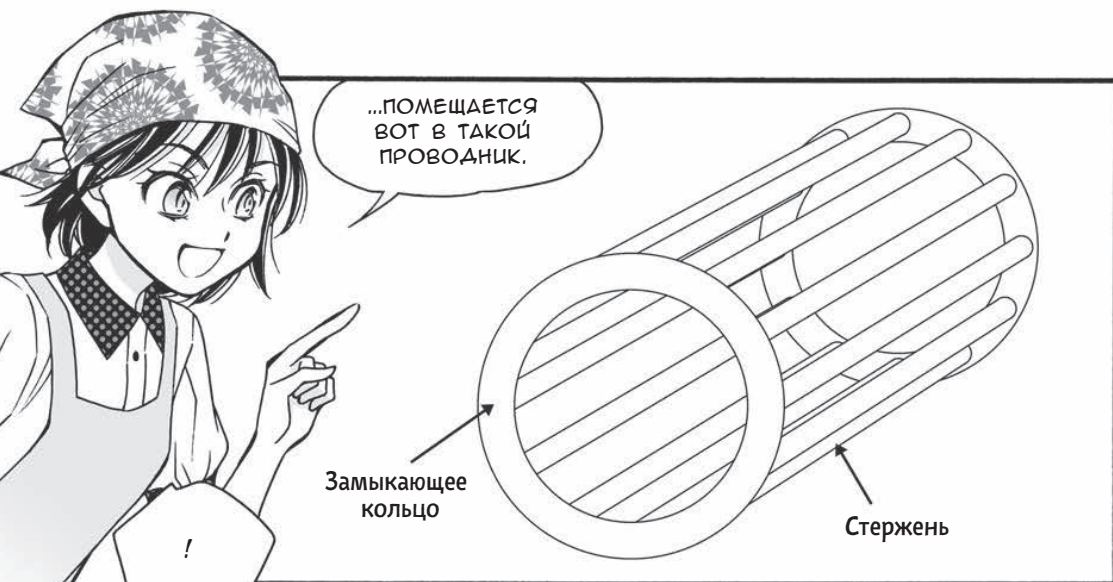


## 6.2. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

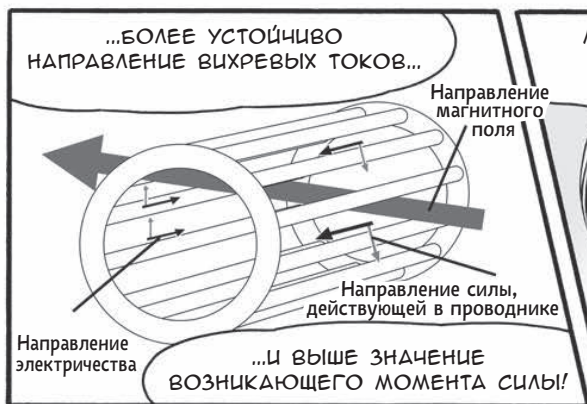












МОЖЕТ БЫТЬ, ЭТО И НЕВОЗМОЖНО,  
НО Я РЕШИТЕЛЬНО ХОЧУ  
СОВЕРШИТЬ ПЕРЕВОРОТ!



ПЕРЕВОРОТ НА НАШЕЙ УЛИЦЕ,  
КОТОРЫЙ ОХВАТИЛ БЫ ЕЁ ВСЮ,  
ПОДОБНО "БЕЛЫХИНОЙ КЛЕТКЕ"?

ВЫ ПОМОЖЕТЕ НАМ В ЭТОМ?!



НО...

КАКИМ ЖЕ  
ОБРАЗОМ  
ВЫ ХОТИТЕ  
СДЕЛАТЬ ТАКОЙ  
ПЕРЕВОРОТ?!



### 6.3. ОСОБЕННОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ЧТОБЫ СОВЕРШИТЬ  
ПЕРЕВОРОТ  
НА НАШЕЙ УЛИЦЕ...

улица  
«Трическая»

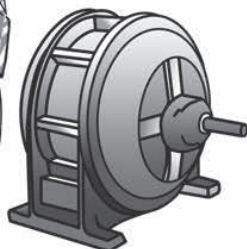
...НАМ ВРЯД ЛИ ПОМОГУТ  
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЛИ  
МОДНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ.

МЫ ПРИНАДЛЕЖИМ К ДРУГОМУ ВРЕМЕНИ...

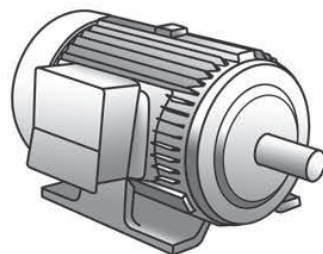
...И НЕ СМОЖЕМ КОНКУРИРОВАТЬ НА РАВНЫХ  
С СОВРЕМЕННЫМИ ТОРГОВЫМИ ЦЕНТРАМИ.

НО У НАС ЕСТЬ СВОЯ СКРЫТАЯ МОЩЬ!

К ПРИМЕРУ, АСИНХРОННЫЕ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ,...



...В ОТЛИЧИЕ ОТ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРО-  
ДВИГАТЕЛЕЙ, НЕ СИНХРОНИЗИРОВАНЫ.  
В НИХ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА...



...НЕМНОГО МЕНЬШЕ,  
ЧЕМ У ВРАЩАЮЩЕГОСЯ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ.



ОТНОСИТЕЛЬНАЯ РАЗНОСТЬ  
СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ  
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  $N_0$   
И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА  $N$   
НАЗЫВАЕТСЯ "СКОЛЬЖЕНИЕМ".

## Скольжение

СКОЛЬЖЕНИЕ МЕНЯЕТСЯ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОМЕНТА СИЛЫ  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.

Скольжение =  $S$

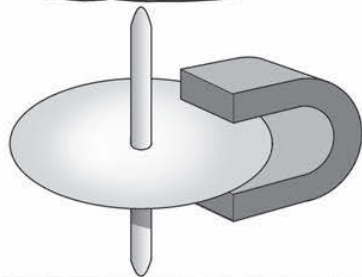
$$S = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

В ОСТАНОВЛЕННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ  
СКОЛЬЖЕНИЕ РАВНО ЕДИНИЦЕ...

...А КОГДА МОМЕНТ СИЛЫ РАВЕН  
НУЛЮ И МОТОР РАБОТАЕТ В РЕЖИМЕ  
"ХОЛОСТОГО ХОДА", ТО СКОЛЬЖЕНИЕ  
РАВНО НУЛЮ.

ОБЫЧНО В ЭЛЕКТРОМОТОРАХ  
УСТАНАВЛИВАЮТ ЗНАЧЕНИЕ  
СКОЛЬЖЕНИЯ МЕНЬШЕ 0,1.  
НАЛИЧИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ -  
ОТЛИЧИТЕЛЬНАЯ ОСОБЕННОСТЬ  
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.

В ДИСКЕ ДРАГО ТОЖЕ  
ЕСТЬ СКОЛЬЖЕНИЕ,  
ПОЭТОМУ ЧИСЛО ОБОРОТОВ  
ДИСКА МЕНЬШЕ, ЧЕМ ЧИСЛО  
ОБОРОТОВ МАГНИТА  
ЗА ТО ЖЕ ВРЕМЯ.





ОДНАКО ЕСЛИ  
СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЗМА,  
ПОДКЛЮЧЁННОГО  
К АСИНХРОННОМУ  
ЭЛЕКТРОМОТОРУ,  
РЕЗКО ИЗМЕНИТСЯ...

...И РЕЗКО УВЕЛИЧИТСЯ  
МОМЕНТ СИЛЫ, ТО  
РАССИНХРОНИЗАЦИЯ  
НЕ ПРОИЗОЙДЁТ, КАК  
В СЛУЧАЕ С СИНХРОННЫМИ  
ЭЛЕКТРОМОТОРАМИ.

ДАЖЕ ЕСЛИ УВЕЛИЧИТСЯ СКОЛЬЖЕНИЕ  
И УМЕНЬШИТСЯ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ,  
ДВИЖЕНИЕ ПРОДОЛЖИТСЯ!

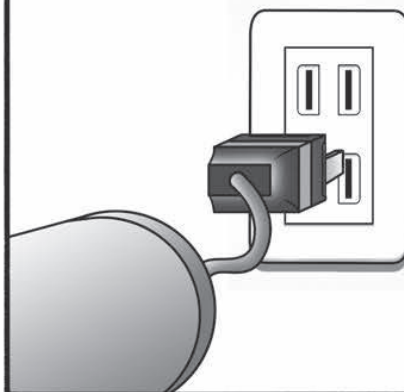
Алюминиевый  
или медный диск

Подшипник

Если момент  
силы большой,  
то вращение замедлится

Скольжение  
увеличится

КРОМЕ ТОГО, ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ  
К ИСТОЧНИКУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА...



...ХОТЯ СКОЛЬЖЕНИЕ  
И МОЖЕТ НЕМНОГО МЕНЯТЬСЯ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ,  
СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ БУДЕТ  
ПРАКТИЧЕСКИ ПОСТОЯННОЙ.

К ТОМУ ЖЕ АСИНХРОННЫМ  
ЭЛЕКТРОМОТОРАМ НЕ ТРЕБУЕТСЯ  
ОПРЕДЕЛЯТЬ ПОЗИЦИЮ РОТОРА

ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ РАССИНХРО-  
НИЗАЦИИ, КАК В СЛУЧАЕ  
СИНХРОННЫХ МОТОРОВ.



РЕГУЛИРОВАТЬ СКОРОСТЬ  
ВРАЩЕНИЯ МОЖНО, ПРОСТО  
УСТАНОВИВ ИНВЕРТОР,  
КОНТРОЛИРУЮЩИЙ  
ЧАСТОТУ ТОКА!



И ЕЩЁ АСИНХРОННЫЕ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ НЕ ИСПОЛЗУЮТ  
ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ...

Чувствительность  
к перепадам  
температуры



...КОТОРЫЕ МЕНЯЮТ СВОИ  
СВОЙСТВА В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

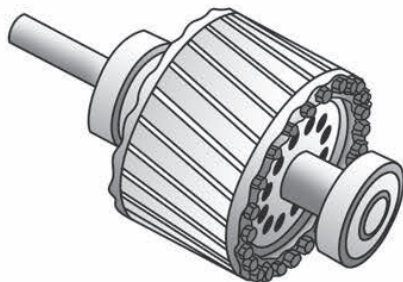
ЕСЛИ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРЕДЕЛ ПРЕВЫШЕН,  
ТО МОЖЕТ ПРОИЗОЙТИ  
РАЗМАГНИЧИВАНИЕ, ПОСЛЕ  
ЧЕГО МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
УЖЕ НЕ ВОССТАНОВЯТСЯ.

POWER  
DOWN



ЖАРКО-  
ЖАРКО

А КОГДА РОТОР ТИПА  
"БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКИ" И ЕГО  
ПРОВОДНИК И СЕРДЕЧНИК  
СДЕЛАНЫ ИЗ МЕТАЛЛА,  
ЕГО МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
ПРИ НОРМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ  
НЕ МЕНЯЮТСЯ!

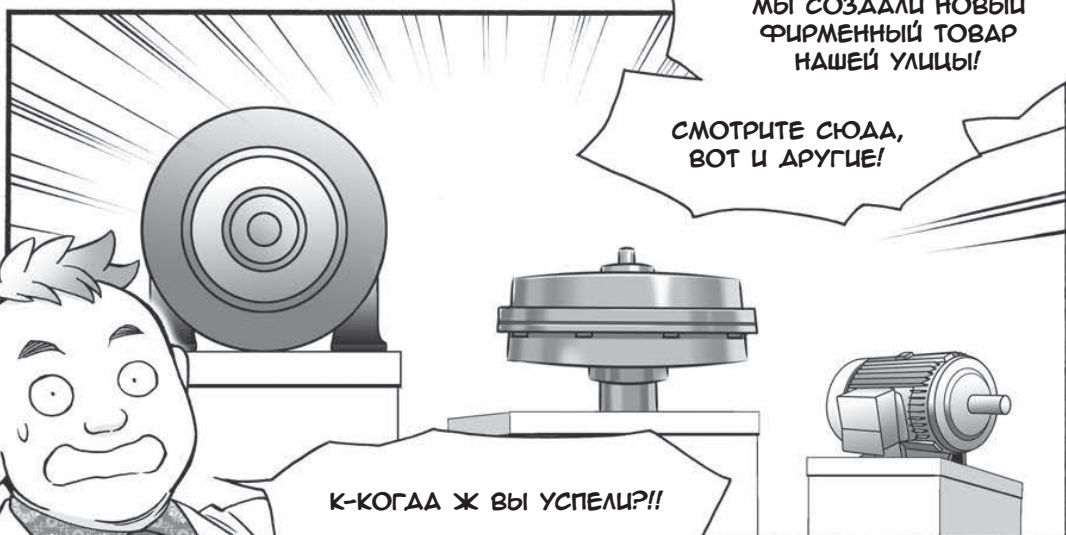
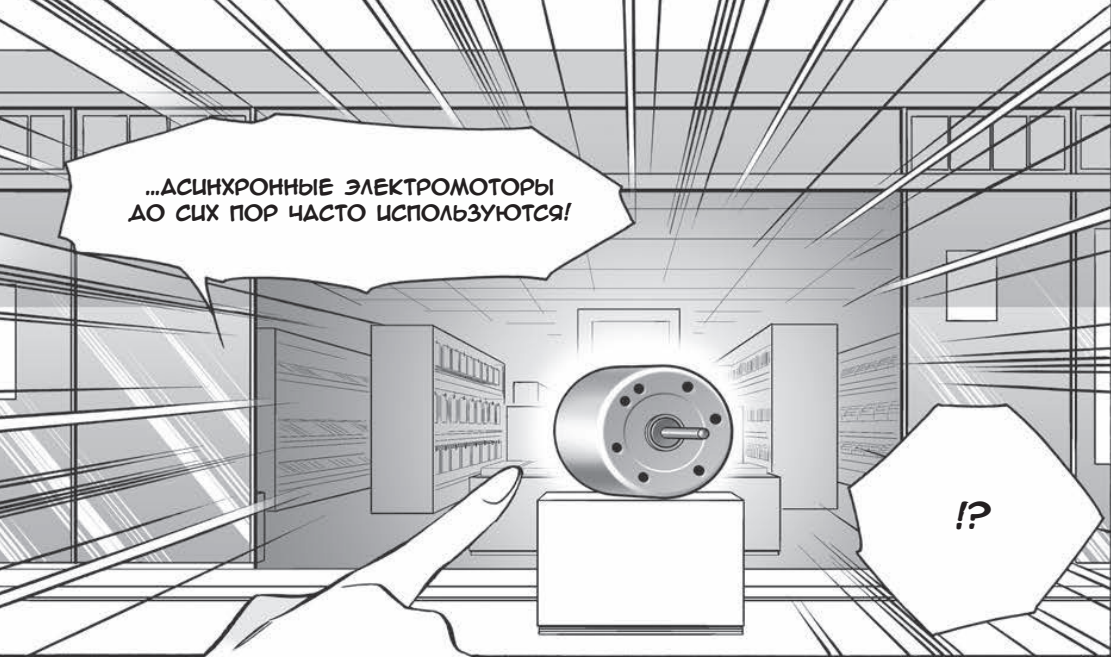


ДРУГИМИ СЛОВАМИ,  
ТАКОЙ ЭЛЕКТРОМОТОР  
НАДЕЖЕН!

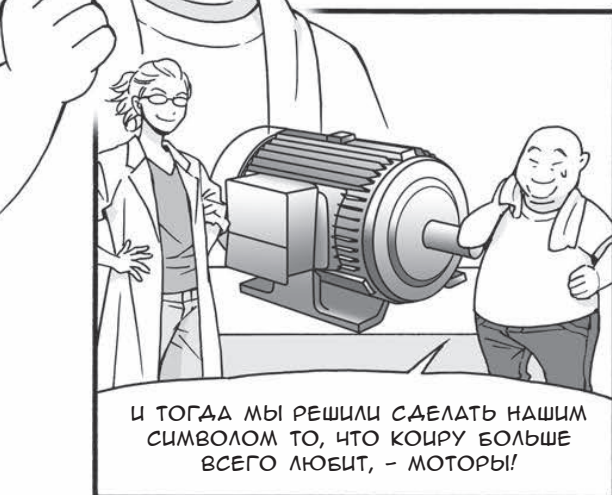
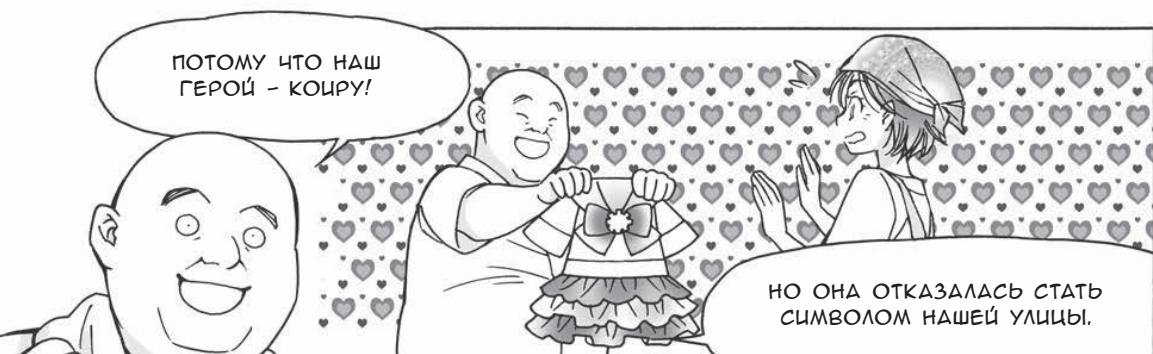
И БЛАГОДАРА ДАЖЕ ТОЛЬКО  
ЭТОМУ ОДНОМУ СВОЙСТВУ...



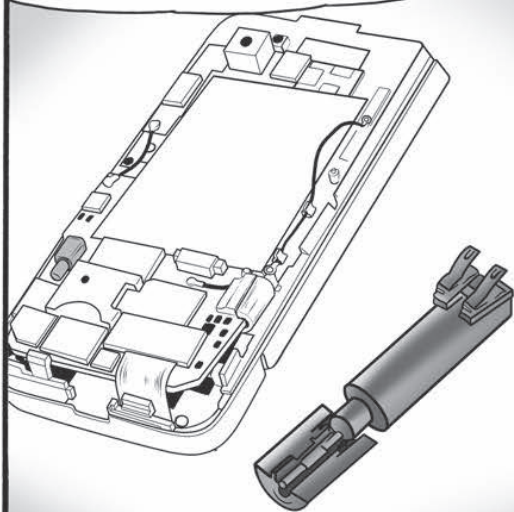




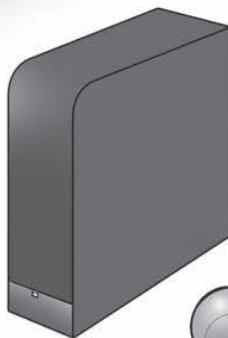




ДЛЯ ВИБРАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ  
ТЕЛЕФОНАХ ИСПОЛЪЗУЮТСЯ  
НЕДОРОГИЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА.

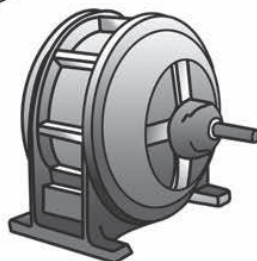
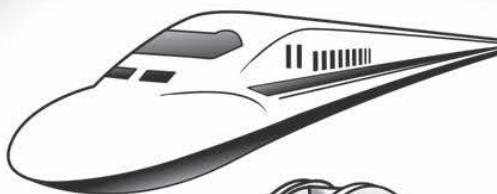


БЕСЩЁТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
С ДОЛГИМ СРОКОМ СЛУЖБЫ  
ИСПОЛЪЗУЮТСЯ В ЖЁСТКИХ  
ДИСКАХ КОМПЬЮТЕРОВ...

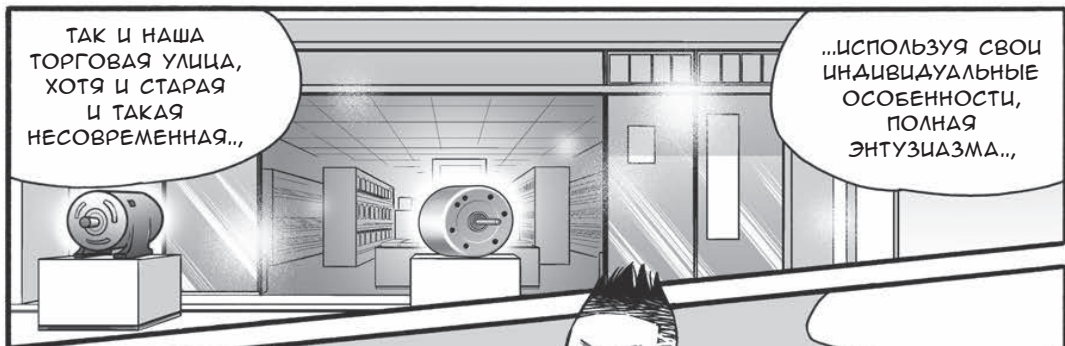


...И В РОБОТАХ.

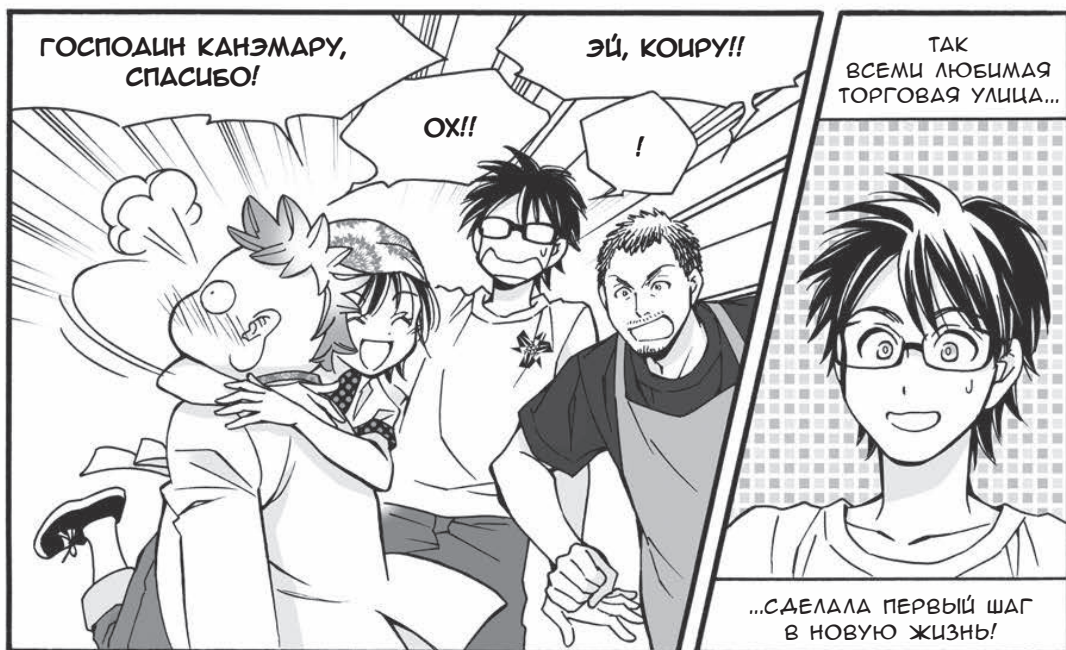
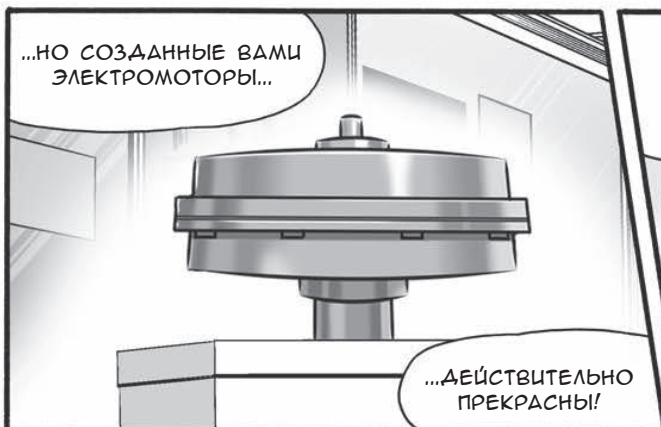
СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ  
С НИЗКИМ ТОКОМ ПРИ ЛЮБОМ  
КОЛИЧЕСТВЕ ОБОРОТОВ  
ИСПОЛЪЗУЮТСЯ В ГИБРИДНЫХ  
АВТОМОБИЛЯХ.



АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЫ,  
ПОТРЕБЛЯЮЩИЕ МАЛО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА  
ДАЖЕ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ,  
ИСПОЛЪЗУЮТСЯ В СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДАХ.







## ДОПОЛНЕНИЕ

Асинхронные электромоторы, так же как и синхронные, работают от трёхфазного переменного тока. Однако, в отличие от синхронных электромоторов, в асинхронных не используется постоянный магнит. В настоящее время широко используются синхронные электромоторы с постоянными магнитами, а до этого в механизмах и в различном оборудовании чаще всего использовались асинхронные электромоторы. Да и до сих пор асинхронные электромоторы часто используются, например в вентиляторах, насосах или электропоездах.



### ПРИНЦИП РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМОТОРОВ

Ранее был объяснён принцип работы асинхронных электромоторов посредством диска Араго. Теперь рассмотрим его с более научной точки зрения. Принцип работы асинхронного электромотора объясняется законом электромагнитной индукции. Итак, рассмотрим упомянутую ранее в главе 2 электромагнитную индукцию более подробно.

Когда между катушкой (проводником) и магнитным потоком возникает взаимодействие подобно звеньям цепи, как показано на рис. 6.1, то говорят, что катушка взаимосвязана с магнитным потоком. А когда катушка взаимосвязана с магнитным потоком, то при изменении величины магнитного потока в катушке возникает электродвижущая сила. Это явление называется электромагнитной индукцией.

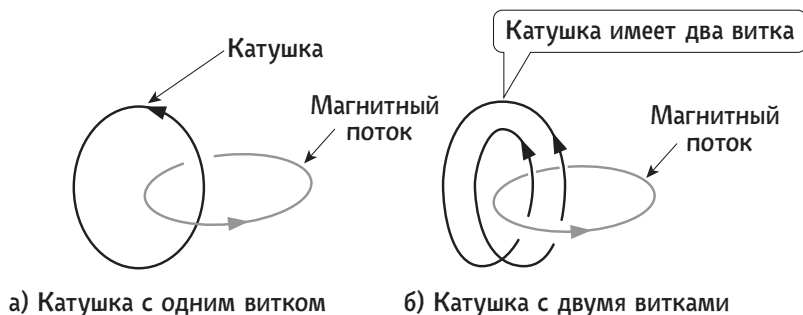


Рисунок 6.1. Взаимосвязь катушки и магнитного потока

Электродвижущая сила (ЭДС), возникшая в результате электромагнитной индукции, называется ЭДС индукции. Величина ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Если катушка с  $N$  витками взаимодействует с магнитным потоком  $\phi$ , то полный магнитный поток будет равен  $N\phi$ . Эта величина называется потокоцеплением  $\psi$ . Если  $\psi$  меняется за время  $t$ , то возникшую при этом вследствие электромагнитной индукции ЭДС индукции  $e$  можно вычислить следующим образом:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{d(N\varphi)}{dt} = -N \frac{d\varphi}{dt}, [\text{В}].$$

Другими словами, величина ЭДС индукции тем выше, чем больше количество витков катушки. Знак минус в формуле ЭДС индукции показывает, что возникающий ток будет течь в направлении, противодействующем изменению магнитного потока.

Так как магнитное поле порождается переменным током, который постоянно меняет своё направление, то и магнитные потоки будут меняться с течением времени. Соответственно, и возникающая в катушке ЭДС индукции будет меняться с течением времени. В главе 2 это было разъяснено на примере ЭДС трансформатора. Кроме того, если магнитный поток или катушка перемещаются, то во взаимосвязанном с катушкой магнитном потоке возникают изменения. В этом случае тоже появляется ЭДС индукции. В главе 2 это явление разъяснялось на примере ЭДС при движении проводника в магнитном поле. С точки зрения электромагнетизма в обоих случаях происходит изменение магнитного потока, взаимосвязанного с катушкой. Когда же используется трёхфазный переменный ток и возникает вращающееся магнитное поле, то так как магнитное поле вращается, во взаимосвязанных с ним катушках будет возникать ЭДС индукции.

В статоре асинхронного (индукционного) электромотора используется трёхфазная катушка. Когда в трёхфазную катушку поступает трёхфазный переменный ток, внутри катушки возникает вращающееся магнитное поле. В роторе асинхронного электромотора используется подобный диску Араго проводник из материалов вроде меди или алюминия. Когда в этом проводнике возникает ЭДС индукции, в нём появляется электрический ток. Благодаря току в проводнике ротора и вращающемуся магнитному полю появляется электромагнитная сила, которая и приводит в движение асинхронный электрический мотор.

Из-за того, что в проводнике ротора возникает ЭДС индукции, скорость вращения ротора и вращающегося магнитного поля различаются. Если бы, подобно синхронным электромоторам, скорости вращения ротора и вращающегося магнитного поля были одинаковыми, то магнитный поток, связанный с проводником ротора, никогда бы не менялся. Скорость вращения асинхронных электромоторов немного ниже, чем скорость вращения вращающегося магнитного поля.





## УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОТОРА

Статор асинхронного электромотора практически такой же, как и у синхронного электромотора. В обоих случаях используется трёхфазная катушка. Однако в роторе асинхронного электромотора используется особого вида проводник, как было показано в этой главе, за что его ещё называют «ротор типа беличья клетка».

Итак, ротор асинхронного электромотора состоит из сердечника и проводника вида «беличья клетка». То есть ротор может состоять только из металла. Конечно, бывает, что в проводнике ротора используется для обмотки катушки эмалированная проволока, но всё-таки чаще всего это проводник вида беличья клетка, сделанный, например, из алюминия. А если отсутствуют магнит и эмалированная проволока, получаем ротор, устойчивый к низким и высоким температурам. То есть для асинхронных электромоторов не нужны теряющие магнитные свойства при высоких и низких температурах магниты и становящиеся мягкими при высоких температурах изоляционные провода (из органических материалов, например эмали). Это одна из причин, почему асинхронные электрические моторы считаются такими надёжными.



## СВОЙСТВА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОТОРОВ

Асинхронные электромоторы используют вращающееся магнитное поле, создаваемое трёхфазной катушкой, но, в отличие от синхронных электромоторов, у асинхронных скорости вращения ротора и вращающегося магнитного поля не синхронизированы. Ротор вращается немного медленнее, чем вращающееся магнитное поле. Относительная разность скорости вращения вращающегося магнитного поля  $N_0$  и скорости вращения мотора  $N$  называется «скольжением». Скольжение  $s$  можно выразить следующим образом:

$$s = -\frac{N_0 - N}{N_0}.$$

Отсюда скорость вращения асинхронного электромотора  $N$  можно выразить через скольжение как

$$N = -\frac{120f}{p}(1 - s). \quad [\text{мин}^{-1}]$$

Например, если четырёхполюсный асинхронный электромотор работает от источника электрического тока с частотой 50 Гц, а скольжение равно 0.05, то

$$\frac{120 \times 50}{4}(1 - 0.05) = 1425. \quad [\text{мин}^{-1}]$$

Это значит, что электромотор будет совершать 1425 оборотов в минуту.

Скольжение связано с возникающим в асинхронном электромоторе моментом силы. Если момент силы равен нулю, то есть мотор работает на холостом ходу, то скольжение будет практически нулевым. Если же момент силы увеличивает-ся, то следом увеличивается и значение скольжения.

Обычно в электромоторах устанавливают значение скольжения меньше 0,1. Следовательно, даже если во время работы электромотора момент силы меняется, то скольжение меняется совсем немного, а значит, и скорость вращения электромотора изменится незначительно.

Если состояние механизма, работающего от асинхронного электромотора, резко изменится, то изменится и скольжение. При этом скорость вращения электромотора изменится только на величину изменения скольжения, а работа электромотора продолжится, потому что, в отличие от синхронных электромоторов, в данном случае не происходит рассинхронизация. Асинхронным электромоторам не требуется определять позицию ротора для защиты от рассинхронизации, как в случае синхронных моторов. У асинхронных электромоторов, работающих от источника переменного тока, независимо от нагрузки скорость вращения практически постоянна. Другими словами, это простой в использовании электромотор, который работает с практически постоянной скоростью вращения и не требует регулировки при подключении к источнику тока.

Чтобы изменить скорость вращения асинхронного электромотора, нужно изменить частоту источника питания. Для регулирования частоты тока используют инвертор. Метод управления асинхронным электромотором с инвертором называют ещё электроприводом с регулируемой частотой и напряжением, или VVVF-приводом (Variable Voltage Variable Frequency – переменное напряжение переменная частота). Итак, асинхронным электромоторам не нужен датчик положения ротора, а скорость вращения можно регулировать изменением частоты питающего напряжения.

Импеданс – понятие, используемое для цепей переменного тока. Импеданс показывает отношение между переменным сопротивлением и переменным током.

Отношение между постоянным напряжением  $E$  и постоянным током  $I$  можно выразить через сопротивление  $R$  следующим образом:

$$E = R \cdot I.$$

Поскольку при условии постоянного тока и постоянного напряжения меняются только количественные значения этих величин, то по закону Ома получается такая простая формула.

Однако в случае переменного напряжения и переменного тока их значения меняются по синусоиде и меняются их знаки. Переменный ток в данном случае выражается формулой:  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $I_m$  – это амплитуда,  $\omega$  – частота,  $\varphi$  – фаза тока. Такие синусоидальные колебания выражаются с помощью комплексных чисел, поэтому в данном случае напряжение обозначается как  $\dot{E}$ , а сила тока как  $\dot{I}$ . В этом случае отношение напряжения и силы тока может быть записано следующим образом:

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

В цепи постоянного тока по закону Ома  $\dot{Z}$  соответствует сопротивлению, в цепи же переменного тока эта величина называется импедансом. Однако обязательным условием является одинаковая частота у напряжения, тока и импеданса.

Так как импеданс – комплексное число, то в общем случае он выражается так:

$$\dot{Z} = R + jX.$$

Здесь вещественная часть  $R$  соответствует сопротивлению в случае постоянного тока. Мнимая часть  $X$  называется реактансом. Единица измерения обоих показателей – Ом  $[\Omega]$ .

Используя импеданс, можно выразить отношение переменного напряжения и переменного тока, которое оказывается подобно закону Ома. То есть в отношении цепи переменного тока тоже можно пользоваться законом Ома.



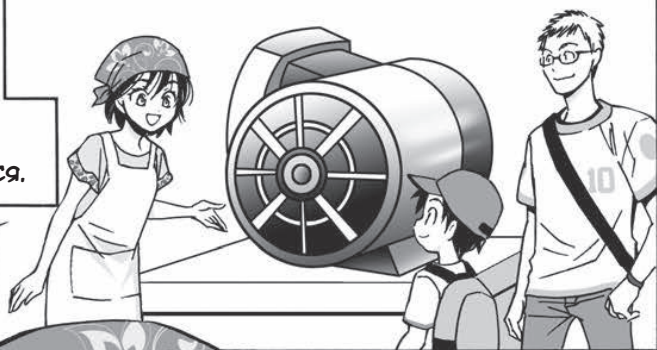


"ТОРГОВАЯ УЛИЦА С МОТОРАМИ"  
ПОЛЬЗУЕТСЯ ПОПУЛЯРНОСТЬЮ  
БОЛЬШЕ, ЧЕМ ОЖИДАЛОСЬ!

ЭНЕРГИЯ КОИРУ, КАЖЕТСЯ,  
НЕИЩЕРПАЕМА.

СО ВСЕМИ  
ПОСЕТИТЕЛЯМИ ОНА  
УСПЕВАЕТ ПООБЩАТЬСЯ.

ПРАВДА, МОТОРЫ  
КЛАССНЫЕ?!

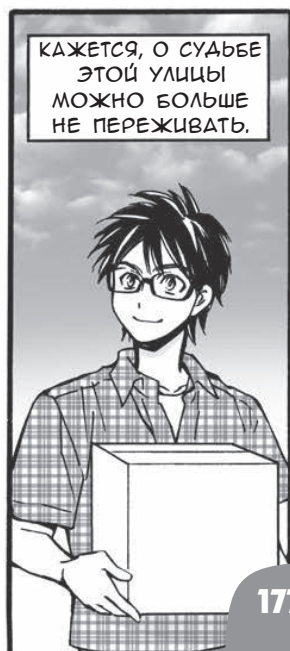
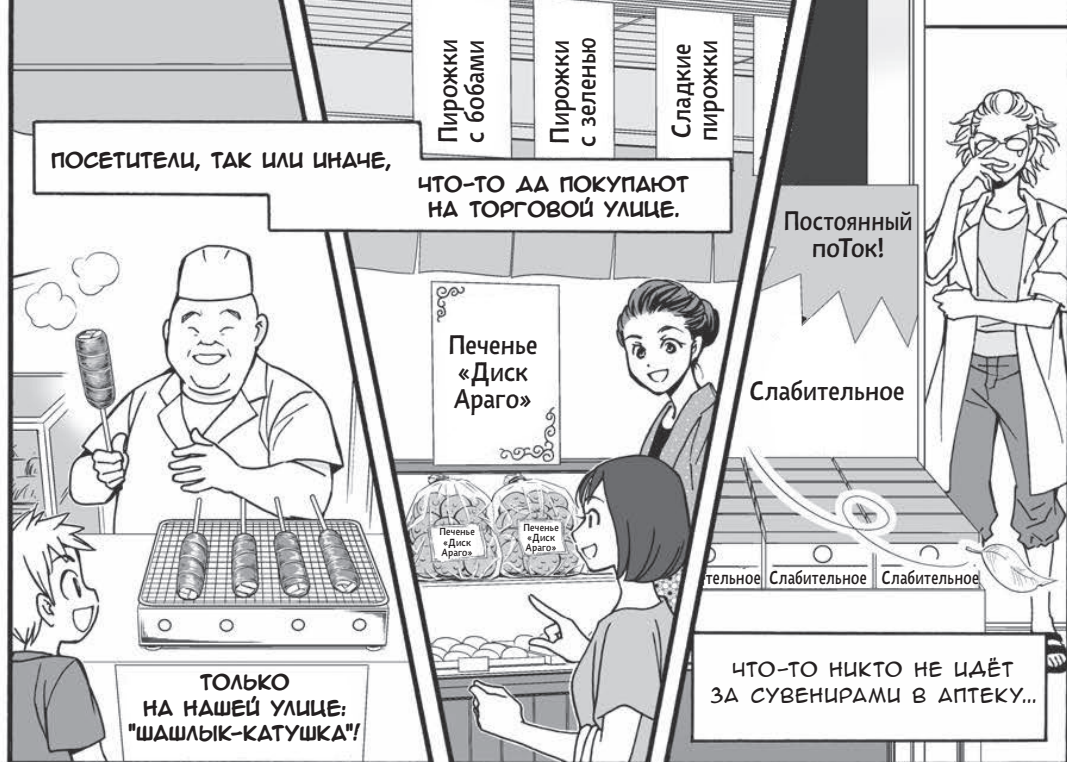


В КОНЦЕ КОНЦОВ,  
ОНА ВСЁ ЖЕ СТАЛА  
"СИМВОЛОМ ТОРГОВОЙ УЛИЦЫ".

И ДАЖЕ СМИ  
ОЧЕНЬ ХОРОШО  
О НЕЙ ОТЗЫВАЮТСЯ.

ПОТОМУ ЧТО ЭТИ  
ЭЛЕКТРОМОТОРЫ...

...ОБЪЕДИНЯЮТ В СЕБЕ  
УМЕНИЯ И ТРУД ЯПОНЦЕВ!





## БЕЗ СИЛ

ОДНА ТОЛЬКО ПРОБЛЕМА  
ОСТАЛАСЬ, СМОГУ ЛИ Я  
ПОЛЬЗОВАТЬСЯ ВЫБРАННОЙ  
ДЛЯ МЕНЯ БЫТОВОЙ  
ТЕХНИКОЙ.

ВРОДЕ И  
ПО-ЯПОНСКИ НАПИСАНО,  
НО НИЧЕГОШЕНЬКИ  
НЕ ПОНИМАЮ.

НО ЕСЛИ Я  
И НЕ РАЗБЕРУСЬ...

КАК ХОРОШО!

МОТОРЫ  
ВСЁ-ТАКИ  
ПРЕКРАСНЫ,  
ПРАВДА?

А-АА.

...ЕСТЬ ЧЕЛОВЕК, У КОТОРОГО  
Я ВСЕГДАА МОГУ СПРОСИТЬ.

ЭТО ВСЁ  
БЛАГОДАРЯ ТЕБЕ,  
СОУТА.

ээ?!





КОГДА ТЫ СКАЗАЛ,  
ЧТО ПОЛЮБИЛ  
НАШУ УЛИЦУ,  
ЭТО ПРИДАЛО  
ВСЕМ УВЕРЕННОСТИ  
В СЕБЕ.

Я БЫЛА ТАК РАДА  
В ТОТ МОМЕНТ,  
ПОТОМУ ЧТО  
НА ЭТОЙ УЛИЦЕ  
Я ВЫРОСЛА.



Я ПОНИМАЮ,  
ЧТО ТЫ СЕЙЧАС  
БУДЕШЬ ОЧЕНЬ  
ЗАНЯТ УЧЁБОЙ,  
НО ВСЁ-ТАКИ  
ПРИХОДИ К НАМ  
ПОЧАЩЕ, ХОРОШО?

К-КОНЕЧНО!



Я ТОЖЕ, ПОСЛЕ ТОГО КАК  
ВСТРЕТИЛ ТЕБЯ, КОЦУ,  
ПРИБОРЕЛ  
УВЕРЕННОСТЬ В СЕБЕ!

!

УВЕРЕННОСТЬ,  
ЧТО Я СМОГУ  
ВЫЖИТЬ  
В ТОКИО.

Я... ТЕБЯ... КОИРУ...

**БА-БАЦ!**

О-О-Ой!!

**БАЦ...  
ДЗЫНЬ...**

!?

Что  
проис-  
ходит?!

ДУМАЙ, ЧЕГО ГОВОРИШЬ.  
ДА ЕЩЁ ПРЯМО  
ПЕРЕД ДОМОМ!

ДА, ЖИЗНЬ В ТОКИО  
ИНТЕРЕСНА  
И НЕПРЕДСКАЗУЕМА.



И ЛЮДИ ЗАЕЗЬ ВСТРЕЧАЮТСЯ  
РАЗНЫЕ, КАК И ТОК:  
ПОСТОЯННЫЕ И ПЕРЕМЕНЧИВЫЕ.

Сэндо

НО У КАЖДОГО  
ЕСТЬ СВОЙ ПУТЬ  
И СВОИ ЗАДАЧИ.

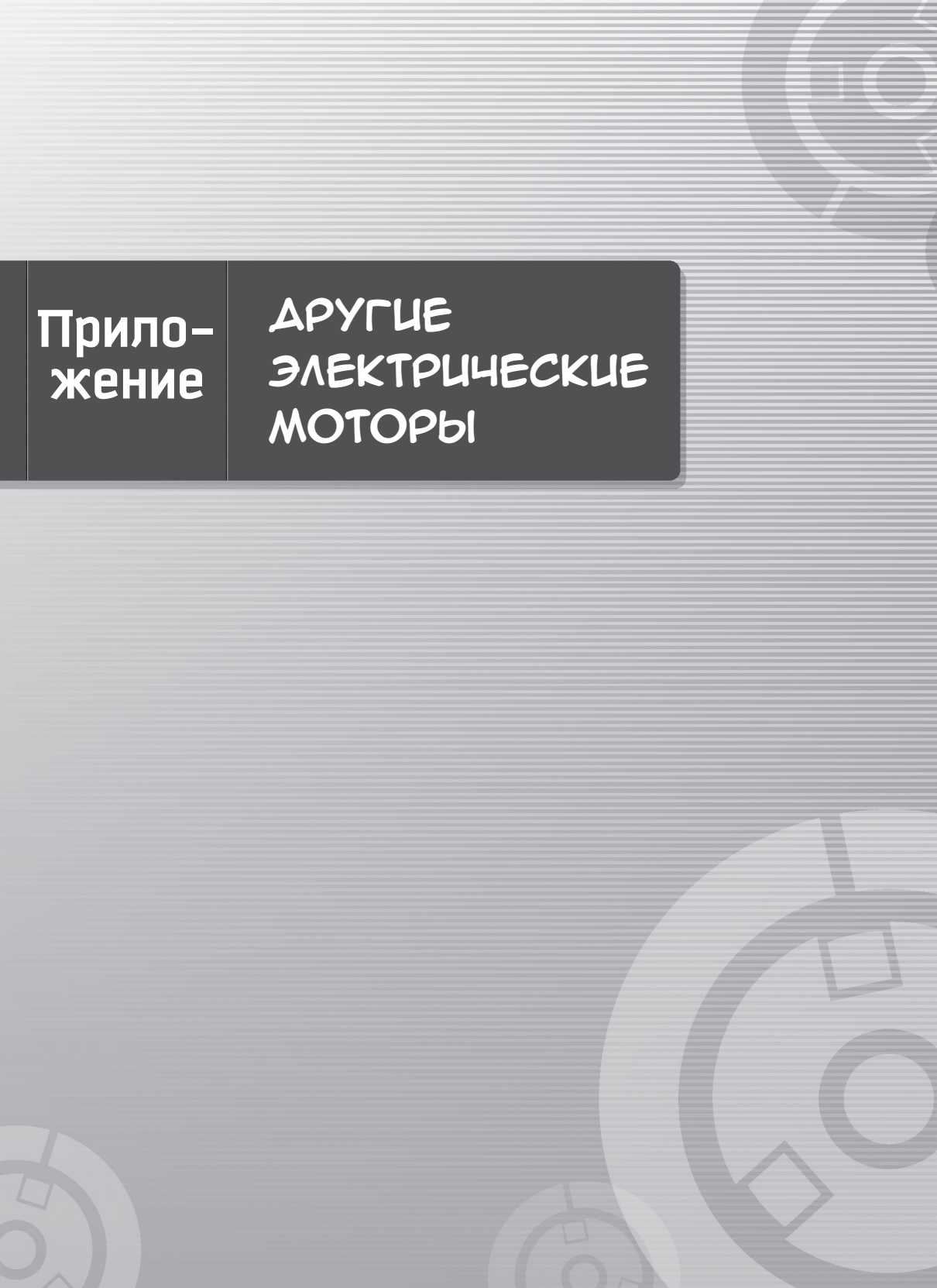


Торговая улица  
«Электрическая»

И Я ТОЖЕ НЕПРЕМЕННО  
НАЙДУ СВОЁ МЕСТО!







Прило-  
жение

ДРУГИЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
МОТОРЫ

Существует ещё много разных видов электрических моторов, кроме четырех рассмотренных в данной книге. Ниже коротко разберём некоторые из них.



## ШАГОВЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР

Шаговый электромотор – это электрический мотор, в котором происходят угловые (шаговые) перемещения ротора, так как работает он от пульсирующего тока (периодически поступающего тока). Поэтому такой электромотор называют иногда пульсирующим. Принцип работы шагового электромотора изображён на рис. А.1. На каждую из катушек статора установлен переключатель. Когда переключатель S1 находится в положении «включен», в катушку 1 поступает ток, который будет идти в направлении к магнитному полюсу N катушки 1. В этом случае полюс S постоянного магнита ротора притянется к полюсу N катушки, и положение стабилизируется в позиции ①, как показано внизу на рисунке. Теперь выключим S1 и включим S2. Ток потечёт по катушке 2, и магнитный полюс катушки 2 станет полюсом N. В этом случае переместившийся вниз магнитный полюс N потянет за собой магнитный полюс S ротора, и ротор совершит поворот до положения полюса N катушки 2 и стабилизируется в позиции ②. И далее, если последовательно включать S3 и S4, ротор будет поворачиваться каждый раз на  $90^\circ$ . Таков принцип работы шагового электромотора, совершающего пошаговые повороты.

Поскольку шаговые электромоторы работают от пульсирующего тока, ими легко управлять с помощью компьютеров, поэтому они часто используются в высокоточном оборудовании.



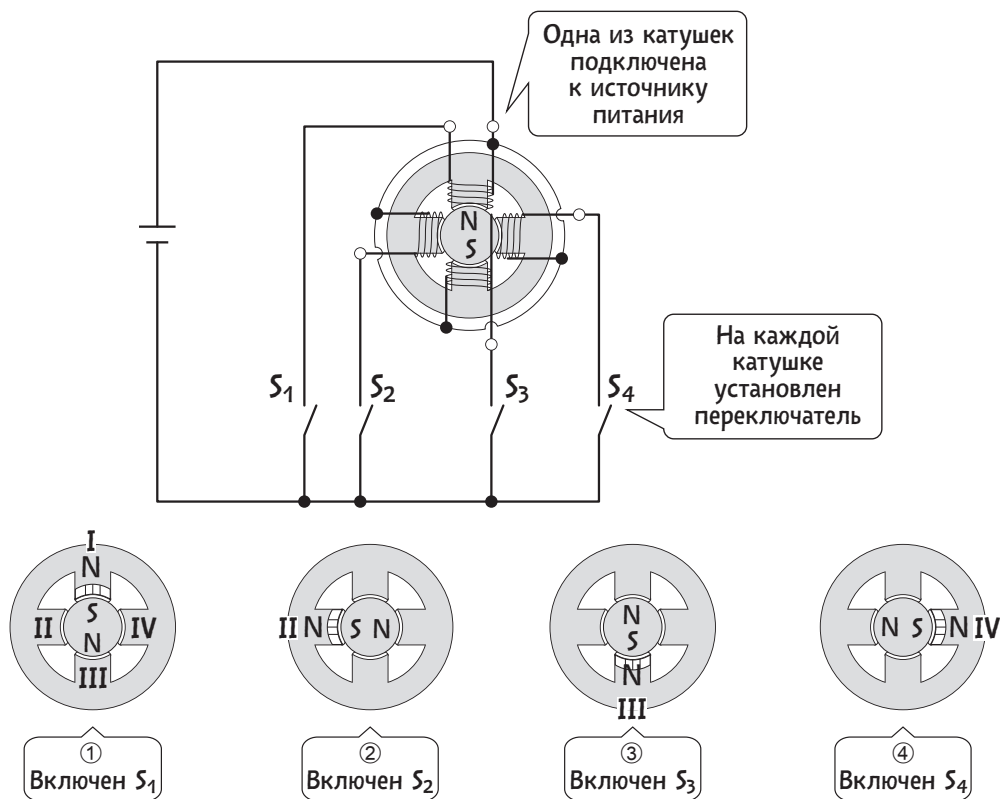


Рисунок А.1. Принцип работы шагового электромотора



## ВЕНТИЛЬНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР

Вентильные реактивные электромоторы называют ещё SR-электромоторами, сокращённо от Switched Reluctance Motor. Ротор таких моторов состоит только из сердечника. Постоянный магнит не используется. Устройство SR-электромотора показано на рис. А.2. Ротор в поперечном сечении представляет собой не круг, а сложную форму со впадинами и выступами. Внутренняя часть статора, там, где располагаются катушки, тоже неровная. То, что у ротора и статора есть такие неровности, является отличительной особенностью вентильных реактивных электромоторов. Когда ротор вращается, длина воздушного зазора между ротором и статором то увеличивается, то уменьшается. Кроме того, в SR-электромоторе, как и в шаговом электромоторе, используется пульсирующий ток.

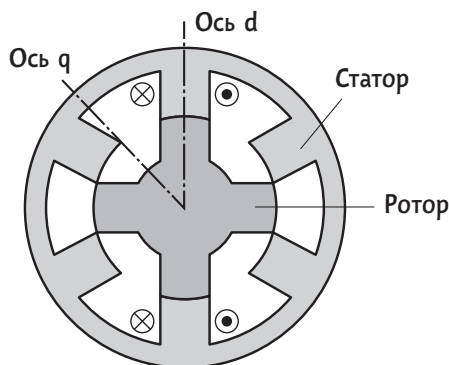
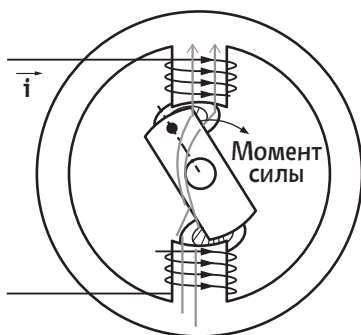
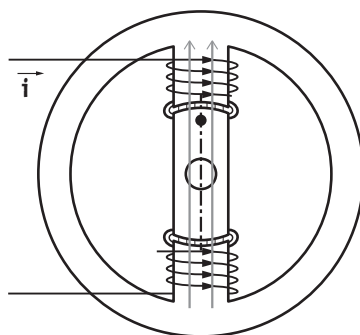


Рисунок А.2. Поперечное сечение SR-электромотора

Для того чтобы понять принцип работы такого электромотора, рассмотрим рис. А.3. На рис. А.3 представлен один комплект катушек, а поперечное сечение ротора представляет собой вырезанный фрагмент круга. Такой ротор сделан полностью из металла. Рассмотрим ситуацию, когда через статор, находящийся в положении, изображенном на рис. А.3, а, идёт ток. В этом случае проходящие через ротор силовые линии магнитного поля будут искривляться, как показано на рисунке. А значит, возникнет тензор напряжений Максвелла, и появится сила, вращающая ротор в направлении по часовой стрелке. Однако если статор придёт в положение, как на рис. А.3, б, то силовые линии магнитного поля будут идти прямо, и сила не появится. Поэтому необходимо отключить ток от данной катушки, перед тем как статор достигнет этого положения, и направить ток в соседнюю катушку. Если таким образом по порядку продолжать переключение тока, то двигатель будет продолжать работать. Принцип работы SR-электромотора очень похож на принцип работы шагового электромотора.



а) Силовые линии магнитного поля искривлены, появляется момент силы, направленный по часовой стрелке



б) Силовые линии магнитного поля прямые, момент силы не возникает

**Рисунок А.3. Принцип работы SR-электромотора**

Вентильные реактивные электромоторы не используют магниты, а их ротор состоит только из сердечника. Они экономно расходуют ресурсы и устойчивы к высоким температурам. Их практическое использование стало возможным благодаря развитию компьютерных технологий и силовых полупроводников (IGBT). Ожидается, что эти электромоторы будут широко использоваться в будущем.

Буква R в аббревиатуре SR означает «reluctance», то есть «магнитное сопротивление». Из-за неровной формы в роторе есть участки как с высоким, так и с низким магнитным сопротивлением. Это свойство используется в работе SR-электромоторов.





## ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОТОР

Линейные электромоторы произошли от развёртывания обычных роторных электромоторов, как показано на рис. А.4. В линейных электромоторах подвижная часть перемещается линейно. Сила, соответствующая моменту силы в роторных электромоторах, в линейных электромоторах называется «тягой».

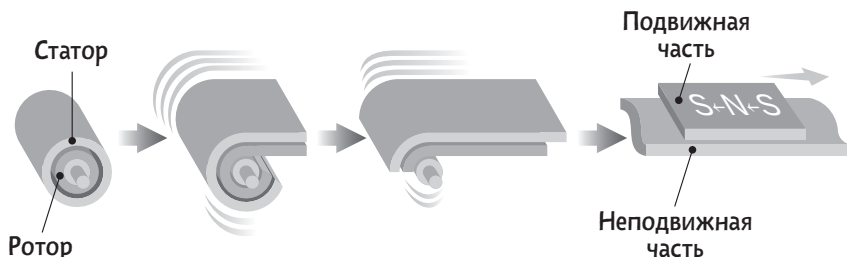


Рисунок А.4. Переход от роторного электромотора к линейному

Все электрические моторы, генерирующие линейно направленные силы, называются линейными. Следовательно, в зависимости от принципа генерирования тяги бывают асинхронные линейные электромоторы, синхронные линейные электромоторы, линейные электромоторы постоянного тока, шаговые линейные электромоторы и т. д. Для каждого из видов линейных электромоторов принципы генерирования тяги совпадают с аналогичными видами роторных электромоторов.

Линейные электрические моторы состоят из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть называется статор, или «первичный элемент», подвижная часть называется якорь, или «вторичный элемент». Вращения элементов нет, поэтому подшипники не нужны. По этой причине подобные электромоторы могут быть меньшего размера, чем электромоторы с вращающимися элементами. Однако из-за невозможности использовать редукторы необходимо увеличивать тягу. Линейные двигатели используются в железнодорожных вагонах, в различных промышленных механизмах, в станках, в бытовых приборах (например, в электробритвах), в автофокусах камер и т. д.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

## А–Z

IGBT ..... 34  
IPM-электромоторы ..... 145  
SPM-электромоторы ..... 145  
VVVF ..... 174

## А

Асинхронные (индукционные)  
электродвигатели. .... 35

## Б

Бесщёточные электромоторы. . 35

## В

Взаимосвязь. .... 171  
Вихревые токи. .... 63  
Вращающееся  
магнитное поле ..... 140

## Д

Датчик положения ..... 144  
Датчик Холла ..... 110  
Диск Араго. .... 171  
Драйвер ..... 36

## И

Импеданс ..... 175  
Инвертор ..... 144  
Индуктивность ..... 147  
Индуктор ..... 84

## К

Количество полюсов. .... 143  
Коллектор ..... 84

## Л

Линейные электродвигатели . . 34

## М

Магнитная индукция ..... 64  
Магнитное поле. .... 60  
Магнитное сопротивление. 187  
Момент силы ..... 66

## Н

Неодимовый магнит . . . 25, 34

## О

Обратная электродвижущая  
сила ..... 87  
Однофазный переменный  
ток ..... 137

## П

Правило вращения винта . . . 61  
Правило левой руки  
Флеминга ..... 73  
Пульсирующие  
электромоторы. .... 184

## **Р**

- Рассинхронизация. . . . . 144  
Ротор. . . . . 35  
Ротор типа  
    «беличья клетка». . . . . 160

## **С**

- Сердечник . . . . . 66  
Сила магнитного  
    отталкивания . . . . . 62  
Сила магнитного  
    притяжения . . . . . 62  
Силовая электроника . . . . . 34  
Синхронизация . . . . . 143  
Синхронные  
    электродвигатели. . . . . 35  
Скольжение . . . . . 173  
Соленоид . . . . . 61  
Статор. . . . . 35

## **Т**

- Тензор напряжений  
    Максвелла. . . . . 65, 145  
Трансформатор . . . . . 64  
Трёхфазный переменный  
    ток . . . . . 137

## **Ф**

- Фотопрерыватель . . . . . 110

## **Ч**

- Частота. . . . . 137

## **Ш**

- Шаговый электрический  
    мотор. . . . . 34

## **Щ**

- Щётки. . . . . 84

## **Э**

- Электродвижущая сила  
    (ЭДС). . . . . 62  
Электродвижущая сила  
    индукции . . . . . 63  
Электромагнитная  
    индукция . . . . . 62  
Электромагнитная сила . . . . 62  
Электродвигатели  
    постоянного тока . . . . . 35  
Электродвигатели  
    с внутренними по-  
        стоянными магнитами. . . . 35  
Электродвигатели  
    с поверхностными по-  
        стоянными магнитами. . . . 35

## **Я**

- Якорь . . . . . 84





Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу:  
115487, г. Москва, 2-й Нагатинский пр-д, д. 6А.  
При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.  
Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.  
Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: **www.a-planet.ru**.  
Оптовые закупки: тел. **(499) 782-38-89**.  
Электронный адрес: **books@aliants-kniga.ru**.

Масаюки Моримото (автор), Рэн Симадзу (художник)

## Образовательная манга Электрические двигатели Манга

Главный редактор *Д. А. Мовчан*  
dmkpress@gmail.com  
Перевод *С. Л. Плеханова*  
Научный редактор *А. Н. Рабодзей*  
Корректор *Г. И. Синяева*  
Верстальщик *А. Ю. Анненков*

Формат 70×100 1/16.  
Гарнитура Anime Ace. Печать офсетная.  
Усл. п. л. 14,63. Тираж 500 экз.

Веб-сайт издательства [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com)

