

сти среды  $\epsilon$ , в случае наэлектризованных проводников, потенциал которых поддерживается постоянным (за счет притекания зарядов от источников тока), сила взаимодействия прямо пропорциональна  $\epsilon$ .

Нечто сходное мы наблюдаем и при магнитных взаимодействиях. Закон Кулона справедлив для полюсов постоянных магнитов с большой коэрцитивной силой, когда величина полюсов практически не изменяется при некотором сближении магнитов и почти не зависит от магнитной проницаемости среды. При указанных условиях сила взаимодействия *неизменных по величине магнитных полюсов* обратно пропорциональна  $\mu$ .

Величина магнитных полюсов соленоида, обтекаемого током, пропорциональна произведению магнитной проницаемости среды на число ампер-витков, размещенных на единице длины соленоида. Стало быть, чтобы величина магнитных полюсов соленоида оставалась неизменной при замене среды, нужно изменить величину тока в соответствии с величиной магнитной проницаемости среды. Если же *величина тока поддерживается постоянной* и вакуум между двумя взаимодействующими соленоидами заменяется средой с магнитной проницаемостью  $\mu$ , то произведение величин магнитных полюсов соленоидов возрастает в  $\mu^2$  раз, а так как сила взаимодействия по закону Кулона в то же время уменьшается в  $\mu$  раз, то в итоге замена вакуума средой  $\mu$  приводит к увеличению силы взаимодействия в  $\mu$  раз.

## § 66. Работа, производимая током при перемещении проводника в магнитном поле. Электромоторы

Вследствие сил, действующих на проводник с током в магнитном поле, проводник с током, перемещаясь по направлению этих сил, может производить работу. Так происходит *преобразование энергии тока в механическую энергию*, что и используется в электромоторах и в разнообразных электродинамических аппаратах.

Закон преобразования электроэнергии в механическую энергию можно вывести из формулы Ампера. Для этого подсчитаем работу, которую совершает токопроводящий контур или часть контура при перемещении под действием сил, вызываемых внешним магнитным полем. Подсчет является наиболее простым в случае однородного поля.

Рассмотрим схему опыта, изображенную на рис. 272. Ток проходит по рельсам и по цилиндру  $ab$ . Цилиндр  $ab$  может свободно катиться по рельсам. Если перпендикулярно к плоскости, в которой расположены рельсы, создано однородное магнитное поле, то на цилиндр  $ab$  перпендикулярно к его длине будет действовать сила в направлении, указанном вытянутым большим пальцем левой руки. Величина этой силы, если величина тока  $I$  выражена в единицах CGSM, определяется формулой (3):

$$F = \mu H l I \text{ дин.}$$

Здесь  $\mu$  — магнитная проницаемость среды (в данном случае для воздуха  $\mu$  можно считать равной единице),  $H$  — напряженность поля и  $l$  — длина цилиндра  $ab$  в сантиметрах.

Пусть под действием этой силы цилиндр из положения  $ab$  передвинулся в положение  $a'b'$  на расстояние  $d$ . Произведенная при этом работа будет, очевидно, выражаться формулой  $A = F \cdot d$ , или, следовательно,

$$A = \mu H I \cdot ld.$$

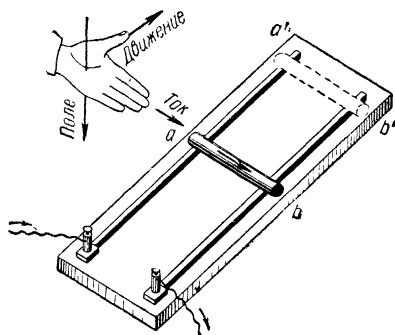


Рис. 272. К вычислению работы тока.

Но  $\mu H$  есть индукция магнитного поля  $B$ . Произведение  $ld$  есть площадь прямоугольника, описанного проводником во время его движения. Следовательно, произведение  $\mu H ld$  представляет собой поток магнитной индукции  $\Delta\Phi$ , проходящий через площадь, описанную проводником. Поэтому приведенную выше формулу, определяющую работу при перемещении токопроводящего контура в магнитном поле, можно написать так:

$$A = I \Delta\Phi \text{ эргов.} \quad (5)$$

Если величина тока измерена не в единицах CGSM, а в амперах, то

$$A = \frac{1}{10} I \Delta\Phi \text{ эргов.} \quad (5a)$$

Эти уравнения показывают, что *работа тока в магнитном поле равна величине тока, умноженной на увеличение потока индукции сквозь площадь, обтекаемую током.*

Проводник при своем движении пересек  $\Delta\Phi$  линий индукции. Поэтому можно сказать, что *работа тока в магнитном поле равна величине тока, умноженной на число линий индукции, которые проводник пересекает при своем движении.*

Все это является справедливым не только для случая однородного поля, но вообще для самого общего случая проводника произвольной формы, движущегося в каком угодно магнитном поле.

Если проводник с током «нагружен» механическим сопротивлением, которое он преодолевает под действием электродинамических сил, и движется в магнитном поле без ускорения, то в этом случае вся работа, определяемая формулой (5), идет на преодоление

механического сопротивления. Когда нагрузка меньше, чем движущие электродинамические силы, проводник с током приобретает в магнитном поле ускорение, и часть энергии, определяемой формулой (5), преобразуется в кинетическую энергию движения проводника. Оба эти случая реализуются в электромоторах: первый при нормальной нагрузке мотора, второй — когда электромотор недогружен. Возможен и третий случай, когда электродинамические силы преодолеваются приложенными к проводнику более мощными механическими силами, так что движение проводника в магнитном поле происходит под действием механических сил и в сторону, прямо противоположную направлению, определяемому правилом левой ладони. И в этом случае, как пояснено в следующей главе, формула (5) остается справедливой как формула, определяющая превращение механической энергии в электрическую энергию (электромотор обращается в электрогенератор).

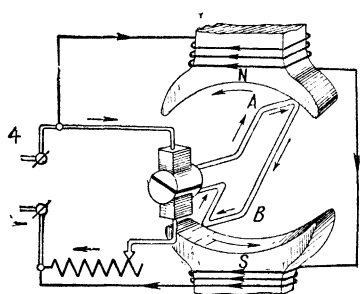


Рис. 273. Схема, поясняющая принцип действия мотора постоянного тока с параллельным возбуждением электромагнитов (шунтовый мотор).

Первый в мире практически пригодный электромотор с непрерывным вращением ротора («якоря») был изобретен и построен в 1834 г. русским ученым Борисом Семеновичем Якоби. До Якоби все иностранные изобретатели шли по ложному пути, пытаясь сконструировать электромотор на основе возвратно-поступательного движения. Принцип действия электромотора пояснен на рис. 273. Между цилиндрическими вогнутыми полюсами  $N$  и  $S$  сильного электромагнита находится прямоугольный проводник  $AB$ , который может свободно вращаться вокруг оси (ось и подшипники не изображены на рисунке). Ток подводится к проводнику  $AB$  посредством двух так называемых щеток, которые касаются двух соединенных с проводником полуколец, называемых коллектором. Применяя правило левой ладони, нетрудно сообразить, что в изображенном на рисунке положении верхняя часть  $A$  прямоугольного проводника находится под действием силы, направленной влево, а нижняя часть  $B$  — под действием силы, направленной вправо. Эта пара сил будет вращать проводник  $AB$  до тех пор, пока его плоскость не окажется расположенной горизонтально. С момента горизонтального положения проводника его вращение, продолжающееся по инерции, стало бы тормозиться обратным направлением сил. Но именно в этот момент теперь автоматически изменяется направление тока в проводнике  $AB$ , так как теперь верхняя щетка будет контактировать с тем полукольцом, которое присоединено к части  $B$  проводника, тогда как проводник  $A$  теперь будет питаться током от нижней щетки. Благодаря этой перемене направления тока сохранится прежнее направление вращающей проводник  $AB$  пары сил. Так получается непрерывное вращение проводника с током в магнитном поле.

Обозначим буквой  $\Phi_0$  поток индукции через площадь, огибаемую проводником  $AB$ , при том положении проводника, когда плоскость его перпендикулярна к направлению сил поля. При каждом полуобороте проводника часть  $A$ , точно так же как и другая часть его  $B$ , пересекает  $\Phi_0$  линий индукции, и, следовательно, каждая из этих частей проводника при каждом полуобороте произ-

водит работу  $I\Phi_0$  эргов (величина тока  $I$  здесь выражена в единицах CGSM). Значит, каждый виток обмотки якоря мотора при полном обороте якоря производит работу  $4I\Phi_0$  эргов.

Если обмотка якоря состоит из  $n$  витков и если якорь делает в минуту  $Z$  оборотов, то работа, производимая якорем в 1 сек., равна  $\frac{4I\Phi_0 n Z}{60}$  эргов. Условимся величину тока  $I$  выражать в амперах, тогда полученное выражение мы должны разделить на 10.

Чтобы представить мощность мотора в лошадиных силах, выразим работу сначала в джоулях, для чего разделим полученное выражение на  $10^7$ , затем, чтобы выразить работу в килограммометрах, разделим полученное выражение еще на 9,81 и, наконец, учитывая, что мощность в 1 л. с. равна 75 кгМ/сек, разделим полученное выражение еще на 75. Таким образом, находим, что при токе  $I$  ампер мощность мотора равна

$$W = \frac{4I\Phi_0 n Z}{100\,000\,000 \cdot 9,81 \cdot 75 \cdot 60} \text{ л. с.}$$

На рис. 274 в дополнение к предыдущему рисунку показано, как результирующее поле электромагнитов и якоря создает пару сил, вращающую якорь

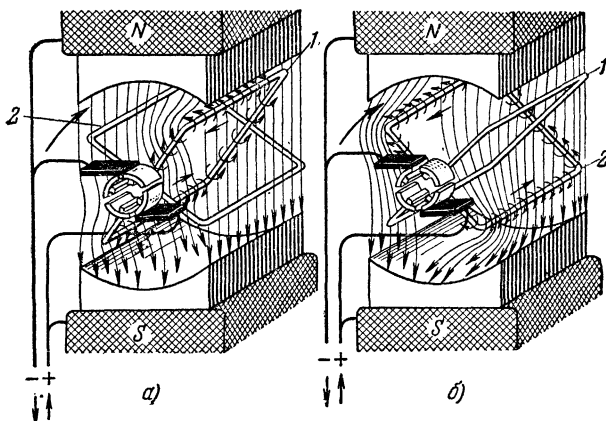


Рис. 274. Деформация однородного магнитного поля, вызываемая током в обмотке якоря мотора.

мотора. Здесь изображены два витка якоря и соответственно четыре сектора коллектора. На рисунке *a* мы видим, что поле, которое было бы однородным при отсутствии тока в якоря, делается неоднородным при сочетании его с полем тока в витке 1. Боковое давление и натяжение силовых линий этого, теперь уже неоднородного, поля создает пару сил, которая в изображенном случае поворачивает якорь по часовой стрелке. При небольшом повороте якоря, как показано на рисунке *b*, ток подается уже не в проводник 1, а в проводник 2; это поддерживает прежнюю по своему виду деформацию поля, но уже около проводника 2. Якорь снова оказывается под действием сил, поворачивающих его по часовой стрелке.

Вначале в электромоторах применяли двутавровые, сдвоенные двутавровые и другие якоря, которые не обеспечивали постоянного, т. е. не зависящего от угла поворота, момента вращающих сил. Электромотор работал толчками, которые приходилось сглаживать, применяя маховые колеса. Другим большим

недостатком применявшихся вначале якостей было плохое замыкание через них потока магнитной индукции, что сильно снижало экономичность электромоторов.

В настоящее время во всех более или менее крупных электромоторах применяют так называемые *барабанные якости*, изобретенные П. Н. Яблочковым (публикацию Яблочкова использовал Гейнер Альтенек, получивший патент). На рис. 275 представлена схема барабанного якоря.

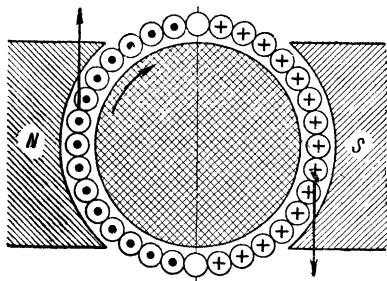


Рис. 275. Схема барабанного якоря.

Обмотка барабанного ротора выполнена так, что по всем проводам, находящимся на левой стороне цилиндра, ток идет в одном направлении, а по всем проводам, находящимся в правой части цилиндра, он идет в обратном направлении. Так как магнитные силовые линии направлены для показанного на рисунке случая слева направо, то все проводники, расположенные в левой его части, будут двигаться вверх. Таким образом возникает пара сил, которая приводит якорь

во вращение по часовой стрелке. При вращении якоря ничто не изменяется во взаимном расположении обмотки и поля.

В те моменты, когда магнитное поле не оказывает действия на одну часть витков, оно с наибольшей движущей силой действует на другие витки. Вследствие этого общая сила, вращающая барабанный якорь, все время остается постоянной.

Обмотка барабанного якоря сложна. Упрощенная модель нескольких витков обмотки барабанного якоря показана на рис. 276. Обмотку укладывают в

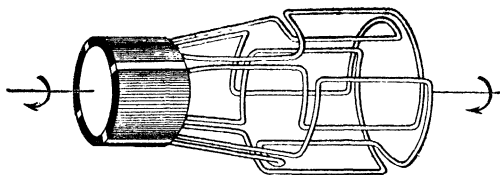


Рис. 276. Модель нескольких витков обмотки барабанного якоря.

пазы сердечника, который набирают из листов железа или специальной (мягкой магнитной) стали, изолированных лаком или прокладками бумаги.

При движении проводников с током под действием магнитного поля величина тока оказывается зависящей от скорости движения проводников. Для электромоторов это обстоятельство — главный фактор, определяющий их режим работы.

Когда ток постоянной величины протекает в цепи неподвижных проводников «первого рода», т. е. таких проводников, которые не испытывают химических изменений под действием тока (металлы и вообще вещества с электронной проводимостью), то вся энергия тока выделяется полностью в форме тепла  $Q$ . Предполагая, что теплота  $Q$  выражена в джоулях, величина тока  $I$  — в амперах, а напряжение  $U$  — в вольтах, мы можем написать, что

$$IUt = Q.$$

Иначе обстоит дело в случае проводника, движущегося под действием магнитного поля. Каждый участок такого движущегося в магнитном поле проводника производит работу, равную произведению силы, с которой на него действует поле, на испытываемое им в направлении этой силы перемещение. Проводник в целом производит работу, определяемую формулой (5). Эта работа может идти на преодоление некоторых сопротивлений или же она может превращаться в кинетическую энергию движения проводника. Очевидно, что суммарная работа  $A$ , производимая всеми участками тока, движущегося под действием поля, должна быть отнесена, так же как и выделяемая током теплота  $Q$ , за счет энергии тока. Следовательно, в этом более общем случае

$$IUt = Q + A. \quad (6)$$

Выделяемая током теплота пропорциональна сопротивлению проводника:  $Q = I^2 R t$ . Понятно, что сопротивление  $R$  проводника, когда проводник приходит в движение под действием поля, остается неизменным. Но энергия тока частью расходуется на производимую током работу, и поэтому в движущемся под действием поля проводнике выделяется за время  $t$  при заданном напряжении подводимого к проводнику тока *меньшее количество тепла*, чем в «неработающем» неподвижном проводнике. Уменьшение тепла  $Q = I^2 R t$  при очевидной неизменности  $R$  за то же время  $t$  указывает на уменьшение величины тока  $I$ .

Сказанное означает, что *когда под действием поля проводник, несущий ток, приходит в движение, в нем возникает обратная электродвижущая сила, уменьшающая величину тока*.

Подставляя в формулу (6) выражение для  $A$  по формуле (5) и разделив полученное уравнение на  $It$ , нетрудно определить величину обратной электродвижущей силы; это приводит к закону Фарадея для электромагнитной индукции, который подробно пояснен в следующей главе.

Итак, при движении проводника с током в магнитном поле во всех случаях, когда это движение вызвано действием магнитного поля на ток, в проводнике индуцируется *обратная электродвижущая сила*, т. е. электродвижущая сила, направленная противоположно приложенному к проводнику напряжению. Электрическая энергия, затрачиваемая на преодоление этой электродвижущей силы, т. е. на то, чтобы при движении проводника относительно магнитного поля поддерживать величину тока в проводнике постоянной, отдается в итоге в форме работы. Другая часть подводимой к проводнику электроэнергии, затрачиваемая на преодоление омического сопротивления проводника, отдается в форме тепла. Некоторая часть электроэнергии с момента возникновения тока остается постоянно связанной с магнитным полем тока.

Возникновение обратной электродвижущей силы в обмотке вращающегося якоря электромотора и преодоление этой электродвижущей силы приложенным извне электрическим напряжением являются самым существенным, основным звеном превращения электроэнергии в механическую энергию вращения якоря.

Для уменьшения непроизводительного выделения тепла током обмотка роторов электромоторов выполняется из толстых медных проводов, так что сопротивление всей этой обмотки обычно составляет десятые доли ома. Поэтому при пуске *мотора параллельного возбуждения (шунтового мотора)* подвод тока к якорю производят обязательно через *пусковой реостат*. По мере увеличения числа оборотов якоря, когда величина тока в нем уменьшается вследствие увеличения обратной электродвижущей силы, реостат постепенно выключают.

Шунтовые моторы малочувствительны к изменениям механической нагрузки: при самых больших колебаниях нагрузки (от холостого хода до нормальной нагрузки) скорость вращения ротора остается почти постоянной. Вместе с тем скорость вращения в этих моторах легко поддается регулировке; для этого, кроме пускового реостата, включенного в цепь якоря, применяют второй *регулируемый реостат*, посредством которого меняют величину тока, ответственного на возбуждение электромагнитов. Указанные свойства: безопасность холостого хода, сохранение почти постоянного числа оборотов при резких колебаниях нагрузки и легкий способ регулирования числа оборотов изменением величины тока, питающего электромагниты, обеспечили шунтовым моторам широкое применение для привода разнообразных станков и инструментов.

Но шунтовые моторы непригодны в тех случаях, когда требуется, чтобы при пуске двигатель сразу развивал большой механический момент вращения. В таких случаях (а они также весьма многочисленны) применяют *моторы последовательного возбуждения (серийс-моторы)*, у которых обмотка электромагнитов подключена не параллельно обмотке якоря, как это показано на рис. 273, а последовательно с ней. В шунтовых моторах для возбуждения электромагнитов ответвляется ток, составляющий несколько процентов от тока в якоре (обмотка электромагнитов делается из большого числа витков тонкого провода), а в серийс-моторах через обмотки якоря и электромагнитов проходит ток одинаковой величины (потому в этом случае обмотку электромагнитов делают из сравнительно небольшого числа витков толстого провода). Серийс-моторы при пуске сразу развивают большой механический момент вращения, и поэтому они незаменимы в качестве тяговых двигателей для трамваев, электровозов железных дорог, для подъемных устройств, прокатных станов, когда необходимо преодолеть наибольшее сопротивление при трогании с места. Но для привода станков они неудобны, так как при уменьшении нагрузки число оборотов у них резко возрастает и при холостом ходе превосходит допустимый предел—мотор, как говорят, «идет вразнос».

На практике в качестве тяговых моторов часто применяют электромоторы с комбинированной обмоткой электромагнитов: одну обмотку включают параллельно обмотке якоря, другую—последовательно с ней (*компаундные электромоторы*).

Мотор постоянного тока последовательного возбуждения может работать и при питании переменным током. Благодаря тому, что в этом случае при перемене направления тока в якоре одновременно меняется полярность электромагнитов, направление вращения не изменяется. Такого рода двигатели, но конструктивно приспособленные для работы от переменного тока, называют *коллекторными моторами*.

Серийс-моторы, применяемые на электрических железных дорогах, обычно имеют мощность от 100 до 1000—3000 л. с. и питаются постоянным током 500—5000 в. Управление моторами на электрических железных дорогах и на многих заводах производится включением и регулировкой вспомогательного сравни-

тельно слабого тока, который приводит в действие особые выключатели (так называемые *контакты*) у моторов и реостатов. Для приведения в движение больших прокатных станов, а также в судовых установках (где генерирование постоянного тока проще всего решает задачу о совместной работе 10—20 дизелей) применяют моторы постоянного тока мощностью в десятки тысяч лошадиных сил.

Широкое применение имеют и крохотные электромоторчики (иногда размером всего в несколько кубических сантиметров); их используют в разнообразных механизмах управления.

### § 67. Отклоняющее действие магнитного поля на электронный поток (в вакууме и в металле)

Отклоняющее действие магнитного поля на электронный поток в вакууме легко обнаруживается, если к вакуум-трубке, в которой образованы катодные лучи, приблизить подковообразный магнит. Происходящее при этом смещение пятна флуоресценции на стенках трубки показывает, что траектория электронов, образующих катодный луч, в магнитном поле уже не является прямолинейной, какой она всегда бывает (независимо от расположения электродов в трубке), когда устранено влияние на катодный луч магнитного поля и поперечного электрического поля (рис. 277). Изучение отклоняющего действия магнитного поля на электронный поток в вакууме привело к созданию ряда замечательных приборов и, кроме того, позволило правильно понять сущность явлений, вызывающих действие магнитного поля на проводники с током.

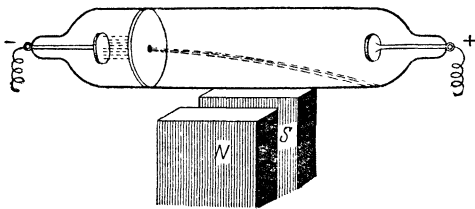


Рис. 277. Отклонение катодных лучей в магнитном поле.

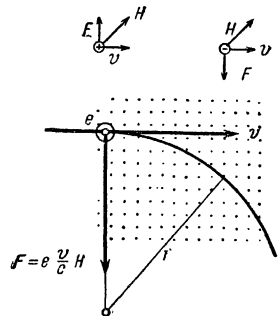


Рис. 278. К обоснованию формулы Лоренца.

Представим себе, что электрон со скоростью  $v$  влетает в горизонтальном направлении в пространство, пронизанное линиями магнитных сил, направленными тоже горизонтально, но пересекающими направление движения электрона под прямым углом (на рис. 278 следы силовых линий, уходящих от наблюдателя перпендикулярно к плоскости чертежа, изображены точками).

Силу, с которой магнитное поле действует на движущийся заряд  $e$ , мы можем определить на основании формулы Ампера. На элемент  $l$  прямолинейного тока однородное магнитное поле, имеющее