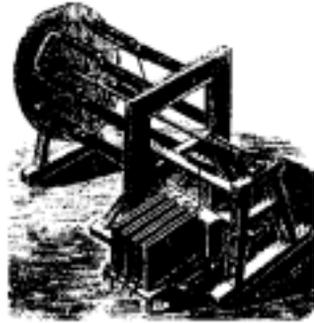


ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Величайшим техническим достижением конца XIX века стало изобретение промышленного электродвигателя. Этот компактный, экономичный, удобный мотор вскоре сделался одним из важнейших элементов производства, вытеснив другие виды двигателей отовсюду, куда только можно было доставить электрический ток. Большими недостатками прежней паровой машины всегда оставались низкий КПД, а также трудность передачи и «дробления» полученной от нее энергии. Обычно одна большая машина обслуживала несколько десятков станков. Движение от нее подводилось к каждому рабочему месту механическим путем с помощью шкивов и бесконечных ремней. При этом происходили огромные неоправданные потери энергии. Электрический привод не имел этих изъянов: он обладал высоким КПД, поскольку с его вала можно было прямо получать вращательное движение (тогда как в паровом двигателе его преобразовывали из возвратно-поступательного), да и «дробить» электрическую энергию было намного проще. Потери при этом оказывались минимальными, а производительность труда возрастала. Кроме того, с внедрением электромоторов впервые появилась возможность не только снабдить любой станок своим собственным двигателем, но и поставить отдельный привод на каждый его узел.

Электрические двигатели появились еще во второй четверти XIX столетия, но прошло несколько десятилетий, прежде чем создались благоприятные условия для их повсеместного внедрения в производство.

Один из первых совершенных электродвигателей, работавших от батареи постоянного тока, создал в 1834 году русский электротехник Якоби. Этот двигатель имел две группы П-образных электромагнитов, из которых одна группа (четыре П-образных электромагнита) располагалась на неподвижной раме. Их полюсные наконечники были устроены асимметрично — удлинены в одну сторону. Вал двигателя представлял собой два параллельных латунных диска, соединенных четырьмя электромагнитами, поставленными на равном расстоянии один от другого. При вращении вала подвижные электромагниты проходили против полюсов неподвижных. У последних полярности шли попеременно: то положительная, то отрицательная. К электромагнитам вращающегося диска отходили проводники, укрепленные на валу машины. На вал двигателя был насажен коммутатор, который менял направление тока в движущихся электромагнитах в течение каждой четверти оборота вала.



Электродвигатель Якоби

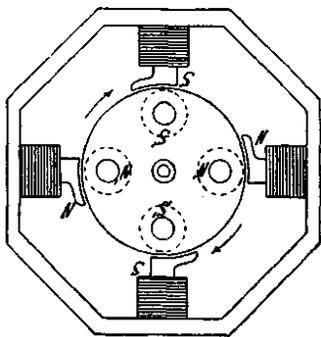
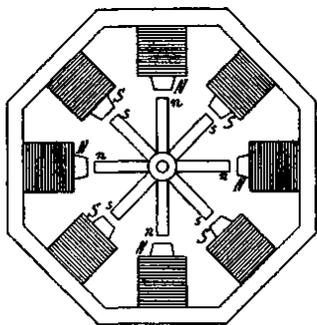


Схема простейшего электродвигателя постоянного тока

Обмотки всех электромагнитов неподвижной рамы были соединены последовательно и обтекались током батареи в одном направлении. Обмотки электромагнитов вращающегося диска были также соединены последовательно, но направление тока в них изменялось восемь раз за один оборот вала. Следовательно, полярность этих электромагнитов также менялась восемь раз за один оборот вала, и эти электромагниты поочередно притягивались и отталкивались электромагнитами неподвижной рамы. Принцип работы этого двигателя поясняет приведенная ниже схема. (Для простоты количество полюсов — подвижных и неподвижных — здесь уменьшено вдвое. Суть от этого не меняется.)

Положим, что в данный момент подвижные электромагниты занимают положение, указанное на рисунке, то есть против каждого полюса неподвижных магнитов стоит одноименный полюс подвижного; при этом каждый неподвижный электромагнит будет отталкивать противоположный магнит барабана и притягивать близлежащий с противоположным полюсом. Если бы полюса неподвижных магнитов не были асимметричны, такое устройство не могло бы работать, так как действие различных магнитов уравнивало бы друг друга. Но благодаря выступу полюсных наконечников неподвижных магнитов каждый из них притягивает ближайший по направлению вращения часовой стрелки слабее, чем другой, из-за этого первый приближается к нему, а последний удаляется. Через четверть оборота (в двигателе Якоби — через одну восьмую) один против другого будут находиться разноименные полюса, но в этот момент коммутатор меняет направление тока в подвижных магнитах, и один против другого будут опять одноименные полюса, как и в начале движения. Вследствие этого подвижные магниты опять получают толчок к тому же направлению, и так без конца, пока остается замкнутым ток.

Коммутатор представлял собой очень важную и глубоко продуманную часть двигателя. Он состоял из четырех металлических колец, установленных на валу и изолированных от него; каждое кольцо имело четыре выреза, которые соответствовали 1/8 части окружности. Вырезы были заполнены изолирующими деревянными вкладышами; каждое кольцо было смещено на 45 градусов по отношению к предыдущему. По окружности кольца скользил рычаг, представлявший собой своеобразную щетку; второй конец рычага был погружен в соответствующий сосуд с ртутью, к которому подводились проводники от батареи (соединения с ртутью были наиболее распространенными в то время контактными устройствами).



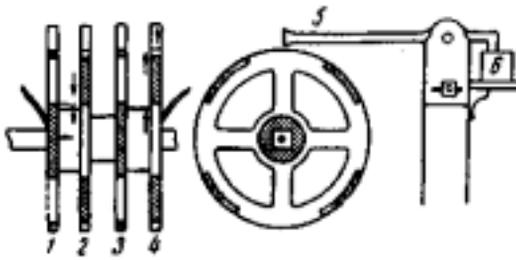
*Принцип синхронного двигателя
переменного тока*

электрическая цепь.

Как уже отмечалось, двигатель Якоби для своего времени был самым совершенным электротехническим устройством. В том же 1834 году подробное сообщение о принципах его работы было представлено Парижской Академии наук. В 1838 году Якоби усовершенствовал свой электромотор и, установив его на гребном боте, с десятью спутниками совершил небольшое плавание по Неве со скоростью 4,5 км/ч. Источником тока ему служила мощная батарея гальванических элементов. Понятно, впрочем, что все эти опыты имели чисто демонстрационный характер — до тех пор, пока не был изобретен и внедрен в производство совершенный электрический генератор, электродвигатели не могли найти широкого применения, так как питать их от батареи было слишком дорого и невыгодно. Кроме того, в силу разных причин, о которых мы будем говорить в следующих главах, двигатели постоянного тока получили лишь ограниченное применение. Гораздо более важную роль играют в производстве электромоторы, работающие на переменном токе, к рассмотрению которых мы теперь переходим.

Сила и направление переменного тока, как мы помним, не являются постоянными. Сила его сначала возрастает от нуля до какой-то максимальной величины и вновь убывает до нуля, затем ток меняет свое направление, возрастает до какого-то отрицательного максимума и вновь убывает до нуля. (Время, за которое величина тока меняется от одного положительного максимума до другого, называют периодом колебания тока.) Этот процесс повторяется с большой частотой. (Например, в осветительной сети ток в 1 секунду течет пятьдесят раз в одну сторону и пятьдесят раз в противоположную.) Как такое поведение тока будет отражаться на работе электродвигателя? Прежде всего надо отметить, что направление вращения электродвигателя не зависит от направления тока, потому что при перемене тока изменится полярность не только в якоре, но одновременно в обмотках, отчего притяжение и отталкивание продолжают действовать в ту же сторону, что и раньше. Из этого как будто бы должно следовать, что для двигателя совершенно безразлично, каким током — постоянным или переменным — он питается. Од-

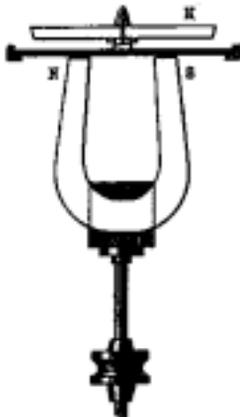
Диски, насаженные на вал двигателя, вращались вместе с ним. По ободу диска скользили металлические рычаги, которые, попадая на непроводящую часть диска, прерывали электрическую цепь, а при соприкосновении с металлом — замыкали ее. Расположение дисков было такое, что в тот момент, когда встречались разноименные полюса, контактные рычажки переходили через грань дерево-металл и этим меняли направление в обмотке электромагнитов. Таким образом, при каждом повороте кольца четыре раза разрывалась



Коммутатор Якоби: 1—4 — металлические кольца; 5 — скользящий контактный рычаг; 6 — батарея

дик из строя. Для переменного тока необходима особая конструкция двигателя. Изобретатели не сразу смогли найти ее. Прежде всего была разработана модель так называемого синхронного двигателя переменного тока. Один из первых таких двигателей построил в 1841 году Чарльз Уитстон.

Устройство синхронного двигателя можно пояснить рисунком. Предположим, что неподвижная часть двигателя (статор) выполнена в виде восьми-полюсного венцеобразного электромагнита, расположенные попеременно полюса которого обозначаются по их полярности буквами N и S. Между ними вращается якорь (или ротор) в виде звездообразного колеса, восемь спиц которого представляют собой постоянные магниты. Их неизменные полюса обозначим буквами n и S. Положим, что через электромагнит пропускается переменный ток. Тогда концы сердечников электромагнита будут попеременно менять свою полярность. Представим себе, что в какой-то момент против каждого полюса электромагнита статора расположен одноименный полюс ротора. Толкнем колесо и сообщим ему такую скорость, при которой каждая спица n пройдет расстояние между двумя соседними сердечниками N

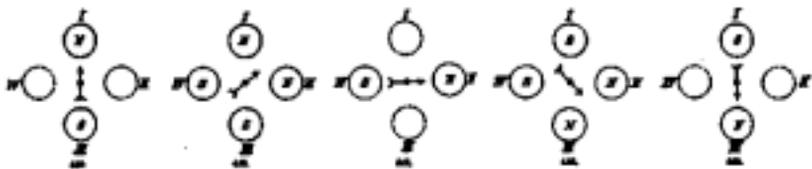


Кружок Арго

и S в промежуток времени, равный тому, в течение которого эти сердечники сохраняют свою полярность неизменной, то есть в период времени, равный половине периода переменного тока, питающего электромагниты. При таких условиях во все время движения спицы от сердечника N до сердечника S все сердечники перемагнитятся, отчего при дальнейшем своем движении спица опять будет испытывать отталкивание со стороны сердечника, оставшегося позади, и притяжение со стороны сердечника, к которому она приближается.

Работавший по этому принципу синхронный двигатель состоял из кольцеобразного многополюсного магнита, полярность которого менялась под действием переменного тока, и из звездооб-

нако это не так. При частом перемагничивании электромагнитов (несколько десятков раз в секунду) в них возникают вихревые токи, которые замедляют вращение якоря и сильно разогревают его. Мощность электромотора резко снижается, и в конце концов он выхо-



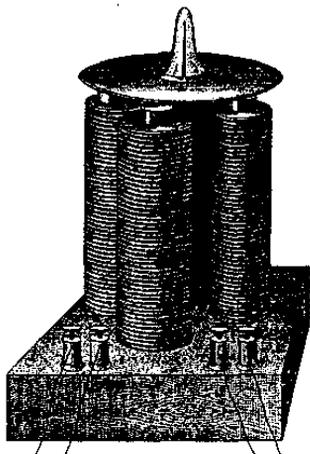
разного постоянного электромагнита, который был насажен на вал и вращался описанным выше образом. Для возбуждения этого постоянного электромагнита требовался постоянный ток, который преобразовывался посредством коммутатора из рабочего переменного. У коммутатора было и другое назначение: он использовался для пуска двигателя, ведь для поддержания вращения ротора синхронного двигателя ему требовалось сообщить определенную начальную скорость. При включении через цепь сначала пускался постоянный ток, благодаря чему двигатель начинал работать как двигатель постоянного тока и приходил в движение. До тех пор, пока двигатель не набрал требуемой скорости, коммутатор переменял направление в движущихся электромагнитах. При достижении скорости, соответствовавшей синхронному ходу, у подвижного магнита полюса уже не менялись, и двигатель начинал работать как синхронный двигатель переменного тока.

Описанная система обладала большими недостатками: кроме того, что синхронный двигатель требовал для своего запуска дополнительный разгонный двигатель, он имел и другой изъян — при перегрузке синхронность его хода нарушалась, магниты начинали тормозить вращение вала, и двигатель останавливался. Поэтому синхронные двигатели не получили широкого распространения. Подлинная революция в электротехнике произошла только

после изобретения асинхронного (или индукционного) двигателя.

Действие асинхронного двигателя будет понятно из следующей демонстрации, которую провел в 1824 году известный французский физик Арго.

Пусть подковообразный магнит N3 приводится рукой в быстрое вращение вокруг вертикальной оси. Над полюсами установлена стеклянная пластина, поддерживающая острие, на которое насажен медный кружок. При вращении магнита индукционные токи, наводимые в кружке, и образованное ими магнитное поле будут взаимодействовать с нижним магнитом, и кружок начнет вращаться в ту же сторону, что и нижний магнит.

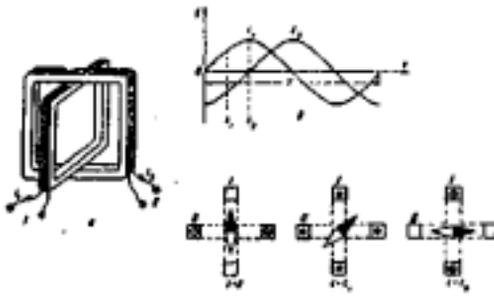


Индукционный двигатель с вращающимися магнитными полюсами Бейли

Именно это явление используется в асинхронном двигателе. Только вместо вращающегося постоянного магнита в нем применяются несколько неподвижных электромагнитов, которые включаются, выключаются и меняют свою полярность в определенной последовательности. Поясним сказанное следующим примером.

Предположим, что I, II, III и IV (на нижнем рисунке) — это четыре полюса двух электромагнитов, между которыми помещена металлическая стрелка. Под действием магнитного поля она намагничивается и становится вдоль линий магнитного поля электромагнитов, выходящих, как известно, из их северного полюса и входящих в южный. Все четыре полюса расположены по окружности на одном расстоянии друг от друга. Сперва ток подводится к II и III. Стрелка остается неподвижной по средней оси магнитных силовых линий. Затем подводится ток ко второму электромагниту. При этом одноименные полюса будут находиться рядом. Теперь средняя направляющая силовых линий магнитов пройдет от середины расстояния между I и II к середине между III и IV, и стрелка повернется на 45 градусов. Отключим первый электромагнит и оставим активными только полюса II и IV. Силовые линии будут направлены от III к IV, вследствие чего стрелка повернется еще на 45 градусов. Снова включим первый электромагнит, но поменяем при этом движение тока, так что полярность первого магнита изменится — стрелка повернется еще на 45 градусов. После отключения второго электромагнита, как это видно на самом верхнем, последнем рисунке, стрелка переместится еще на 45 градусов, то есть совершит полуоборот. Легко понять, как заставить ее совершить вторую половину круга.

Описанное нами устройство в основных чертах соответствует двигателю Бейли, изобретенному в 1879 году Бейли устроил два электромагнита с четырьмя крестообразно расположенными полюсами, которые он мог намагничивать с помощью выключателя. Над полюсами он установил медный кружок, подвешенный на острие. Изменяя полярности магнита, включая и выключая их, он заставил кружок вращаться точно так же, как это происходило в опыте Арго. Идея подобного двигателя чрезвычайно интересна, так как в отличие от двигателей постоянного тока или синхронных электромоторов, здесь не надо подводить ток к ротору. Однако в той форме, в которой его создал Бейли, асинхронный двигатель еще не мог иметь применения: переключение электромагнитов в нем происходило под действием сложного коллектора, и, кроме того, он имел очень низкий КПД. Но до того, чтобы этот тип электромотора получил право на жизнь, оставался только шаг, и он был сделан после появления техники многофазных токов. Собственно, многофазные токи и получили применение, прежде всего благодаря электродвигателям. Чтобы понять, что такое, к примеру, двухфазный ток, представим себе два независимых друг от друга проводника, в которых протекают два совершенно одинаковых переменных тока. Единственная разница между ними заключается в том, что они не одновременно достигают своих максимумов (на рисунке, который приведен ниже, второй ток отстает от первого на четверть



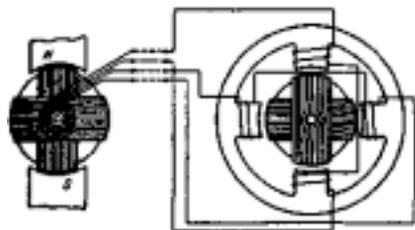
Образование вращающегося магнитного поля

говорят, что тот питается двухфазным током. Соответственно, может быть трехфазный ток (если питание прибора происходит от трех одинаковых токов, сдвинутых друг относительно друга по фазе), четырехфазный ток и т. д. Долгое время в технике использовался только обычный переменный ток (который по аналогии с многофазными токами стали называть однофазным). Но потом оказалось, что многофазные токи в некоторых случаях гораздо удобнее однофазного.

В 1888 г. итальянский физик Феррарис и югославский изобретатель Тесла (работавший в США) открыли явление вращающегося электромагнитного поля. Сущность его заключалась в следующем. Возьмем две катушки, состоящие из одинакового числа витков изолированного провода, и разместим их взаимно перпендикулярно так, чтобы одна катушка входила в другую (рис. а). Теперь представим, что катушку 1 обтекает ток I_1 , а катушку 2 — ток I_2 , причем I_1 опережает I_2 по фазе на четверть периода. Это, как мы уже говорили, означает, что ток I_1 достигает положительного максимума в тот момент, когда сила тока I_2 равна нулю (см. рис.). Если мы мысленно разрежем катушки пополам горизонтальной плоскостью и будем смотреть на них сверху, то увидим сечения четырех сторон обеих катушек. Поместим между ними магнитную стрелку и будем наблюдать за ее движением. Катушки, через которые протекает переменный ток, как известно, являются электромагнитами. Их магнитное поле будет взаимодействовать со стрелкой, поворачивая ее. Рассмотрим теперь положение магнитной стрелки, ось которой совпадает с вертикальной осью катушек в различные моменты времени (см. рис.). В начальный момент времени ($t=0$) ток в первой катушке равен нулю, а во второй проходит через отрицательный максимум (направление тока на рисунке будем обозначать так, как это делается в электротехнике — точкой и крестиком; крестик означает, что ток направляется от наблюдателя за плоскость чертежа, а точка — что ток направляется к наблюдателю). При этом магнитная стрелка займет положение, указанное на первой схеме. В момент t , токи I_1 и I_2 равны друг другу, но один имеет положительное направление, а другой — отрицательное. Магнитная стрелка займет положение, указанное на второй схеме. В момент t_2 величина тока I_2 нисходит до нуля, а ток I_1 достигает

периода: то есть в тот момент, когда сила первого тока максимальна, сила второго тока равна нулю, а когда сила первого тока равна нулю, сила второго — максимальна). Про такие токи говорят, что они сдвинуты друг относительно друга по фазе, а если эти токи подводятся к одному электроприбору,

максимума. Стрелка при этом повернется еще на $1/8$ оборота. Проследивая подобным образом развитие процесса, мы заметим, что по окончании периода изменений одного из токов магнитная стрелка завершит полный оборот вокруг оси. Далее процесс повторяется. Следовательно, при помощи двух катушек, питаемых двумя токами, сдвинутыми друг относительно друга по фазе на четверть периода, можно получить тот же эффект перемены магнитных полюсов, которого добился в своем двигателе Бейли, но здесь это получается намного проще, без всякого коммутатора и без использования скользящих контактов, поскольку перемагничиванием управляет сам ток. Описанный эффект получил в электротехнике название равномерно вращающегося магнитного поля. На его основе Tesla сконструировал первый в истории двух-

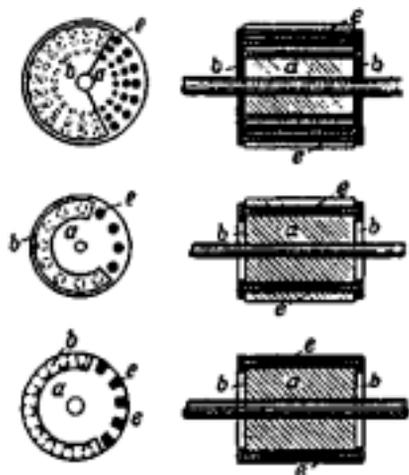


*Схема двухфазного генератора
и двухфазного двигателя Теслы*

фазный асинхронный двигатель. Он вообще был первым, кто стал экспериментировать с многофазными токами и успешно разрешил проблему генерирования таких токов.

Поскольку получить двухфазный ток из однофазного было непросто, Tesla построил специальный генератор, который сразу давал два тока с разностью фаз в 90 градусов (то есть с отставанием на четверть периода). В этом генераторе между полюсами магнита вращались две взаимно перпендикулярные катушки. В то время, когда витки одной катушки находились под полюсами и индуцирующийся в них ток был максимальным, витки другой катушки находились между полюсами (на нейтральной линии) и электродвижущая сила в них была равна нулю. Следовательно, два тока, генерируемые в этих катушках, были тоже сдвинуты по фазе относительно друг друга на четверть периода. Аналогичным способом можно получить трехфазный ток (используя три катушки под углом 60 градусов друг к другу), но Tesla считал наиболее экономичной двухфазную систему. В самом деле, как это видно из рисунка, многофазные системы тока требуют большого количества проводов. Если двигатель, работающий на обычном переменном (однофазном) токе, требует всего двух подводящих проводов, то работающий на двухфазном — уже четырех, на трехфазном — шести и т. д. Концы каждой катушки были выведены на кольца, расположенные на валу генератора. Ротор двигателя тоже имел обмотку в виде двух расположенных под прямым углом друг к другу замкнутых на себя (то есть не имеющих никакой связи с внешней электрической цепью) катушек.

Изобретение Tesla знаменовало собой начало новой эры в электротехнике и вызвало к себе живейший интерес во всем мире. Уже в июне 1888 году фирма «Вестингауз Электрик Компани» купила у него за миллион долларов все патенты на двухфазную систему и предложила организовать на своих



*Роторы "в виде беличьей клетки"
Доливо-Добровольского*

заводах выпуск асинхронных двигателей. Эти двигатели поступили в продажу в следующем году. Они были гораздо лучше и надежнее всех существовавших до этого моделей, но не получили широкого распространения, так как оказались весьма неудачно сконструированы. Обмотка статора в них выполнялась в виде катушек, насаженных на выступающие полюса. Неудачной была и конструкция ротора в виде барабана с двумя взаимно перпендикулярными, замкнутыми на себя катушками. Все это заметно снижало качество двигателя как в момент пуска, так и в рабочем режиме.

Вскоре индукционный двигатель Теслы был значительно переработан и усовершенствован русским электротехником Доливо-Добровольским. Исключенный в 1881 году по политическим мотивам из Рижского политехнического института, Доливо-Добровольский уехал в Германию. Здесь он закончил Дармштадтское высшее техническое училище и с 1887 года начал работу в крупной германской электротехнической фирме АЭГ. Первым важным новшеством, которое внес Доливо-Добровольский в асинхронный двигатель, было создание ротора с обмоткой «в виде беличьей клетки». Во всех ранних моделях асинхронных двигателей роторы были очень неудачными, и поэтому КПД этих моторов был ниже, чем у других типов электрических двигателей. (Феррарис, о котором упоминалось выше, создал асинхронный двухфазный двигатель с КПД порядка 50% и считал это пределом.) Очень большое значение играл здесь материал, из которого изготавливался ротор, поскольку тот должен был удовлетворять сразу двум условиям: иметь малое электрическое сопротивление (чтобы индуцируемые токи могли свободно протекать через его поверхность) и иметь хорошую магнитную проницаемость (чтобы энергия магнитного поля не растрачивалась напрасно). С точки зрения уменьшения электрического сопротивления лучшим конструктивным решением мог бы стать ротор в виде медного цилиндра. Но медь плохой проводник для магнитного потока статора и, КПД такого двигателя был очень низким. Если медный цилиндр заменяли стальным, то магнитный поток резко возрастал, но, поскольку электрическая проводимость стали меньше, чем меди, КПД опять был невысоким. Доливо-Добровольский нашел выход из этого противоречия: он выполнил ротор в виде стального цилиндра (что уменьшало его магнитное сопротивление), а в просверленные по периферии последнего каналы стал закла-

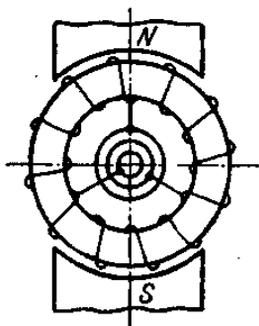
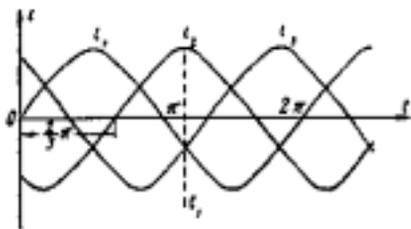


Схема соединения на кольцевом якоре генератора для получения трехфазного тока

дывать медные стержни (что уменьшало электрическое сопротивление). На лобовых частях ротора эти стержни электрически соединялись друг с другом (замыкались сами на себя). Решение Доливо-Добровольского оказалось наилучшим. После того как он получил в 1889 году патент на свой ротор, его устройство принципиально не менялось вплоть до настоящего времени.

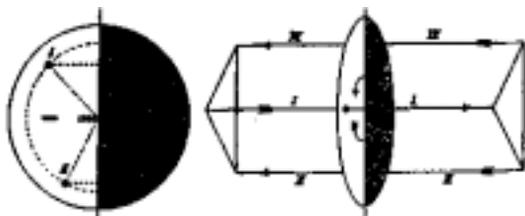
Вслед за тем Доливо-Добровольский стал думать над конструкцией статора — неподвижной части двигателя. Конструкция Теслы казалась ему нерациональной. Поскольку КПД электрического двигателя напрямую зависит оттого, насколько полно магнитное поле статора

используется ротором, то, следовательно, чем больше магнитных линий статора замыкаются на воздух (то есть не проходят через поверхность ротора), тем больше потери электрической энергии и тем меньше КПД. Чтобы этого не происходило, зазор между ротором и статором должен быть как можно меньше. Двигатель Теслы с этой точки зрения был далек от совершенства — выступающие полюса катушек на статоре (как это видно на рисунке) создавали слишком большой зазор между статором и ротором. Кроме того, в двухфазном двигателе не получалось равномерное движение ротора. Исходя из этого, Доливо-Добровольский видел перед собой две задачи: повысить КПД двигателя и добиться большей равномерности его работы. Первая задача была несложной — достаточно было убрать выступающие полюса электромагнитов и равномерно распределить их обмотки по всей окружности статора, чтобы КПД двигателя сразу увеличилось. Но как разрешить вторую проблему? Неравномерность вращения можно было заметно уменьшить, лишь увеличив число фаз с двух до трех. Но был ли этот путь рациональным? Получить трехфазный ток, как уже говорилось, не представляло большого труда. Построить трехфазный двигатель тоже было нетрудно — для этого достаточно разместить на статоре три катушки вместо двух и каждую из них



Кривые токов, сдвинутые по фазе на 120 градусов

соединить двумя проводами с соответствующей катушкой генератора. Этот двигатель должен был по всем параметрам быть лучше двухфазного двигателя Теслы, кроме одного момента — он требовал для своего питания шести проводов, вместо четырех. Таким образом, система становилась чрезмерно громоздкой и дорогой. Но, может быть, существовала



Направление тока в трехфазном проводнике

возможность подключить двигатель к генератору как-нибудь по другому? Доливо-Добровольский проводил бессонные ночи над схемами многофазных цепей. На листах бумаги он набрасывал все новые и новые варианты

ты. И, наконец, решение, совершенно неожиданное и гениальное по своей простоте, было найдено.

Действительно, если сделать ответвления от трех точек кольцевого якоря генератора так, как это показано на рисунке, и соединить их с тремя кольцами, по которым скользят щетки, то при вращении якоря между полюсами на каждой щетке будет индуцироваться один и тот же по величине ток, но со сдвигом во времени, которое необходимо для того, чтобы виток переместился по дуге, соответствующей углу 120 градусов. Иначе говоря, токи в цепи будут сдвинуты относительно друг друга по фазе также на 120 градусов. Но этой системе трехфазного тока оказалось присуще еще одно чрезвычайно любопытное свойство, какого не имела ни одна другая система многофазных токов — в любой произвольно взятый момент времени сумма токов, текущих в одну сторону, равна здесь величине третьего тока, который течет в противоположную сторону, а сумма всех трех токов в любой момент времени равна нулю.

Например, в момент времени t , ток I_2 проходит через положительный максимум, а значения токов I_1 и I_3 , имеющих отрицательное значение, достигают половины максимума и сумма их равна току I_2 . Это означает, что в любой момент времени один из проводов системы передает в одном направлении такое же количество тока, какое два других вместе передают в противоположном направлении. Следовательно, предоставляется возможность пользоваться каждым из трех проводов в качестве отводящего проводника для двух других, соединенных параллельно, и вместо шести проводов обойтись всего тремя!

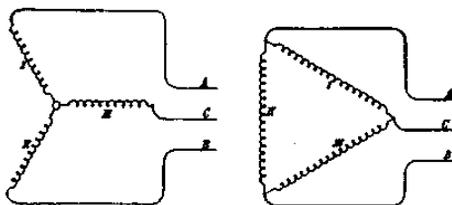
Чтобы пояснить этот чрезвычайно важный момент, обратимся к воображаемой схеме. Представим себе, что через круг, вращающийся вокруг своего центра, проходят три соединенных между собой проводника, в которых протекают три переменных тока, сдвинутых по фазе на 120 градусов. При своем вращении каждый проводник находится то на положительной, то на отрицательной части круга, причем при переходе из одной части в другую ток меняет свое направление. Из рисунка видно, что эта система вполне обеспечивает нормальное протекание (циркуляцию) токов. В самом деле, в некоторый момент времени проводники I и II оказываются соединенными параллельно, а III — отводит от них ток. Некоторое время спустя II переходит на ту же сто-

рону, где находится III; теперь уже II и III работают параллельно, а I как общий отводящий ток провод. Далее III переходит на ту сторону, где еще находится I; теперь II отводит то количество, что III и I подводят вместе. Затем I переходит на ту сторону, где еще находится II, и т. д.

В приведенном примере ничего не говорилось об источниках тока. Как мы помним, этим источником является трехфазный генератор. Изобразим обмотки генератора в виде трех катушек. Для того чтобы протекание тока происходило описанным нами способом, эти катушки могут быть включены в цепь двояким образом. Мы можем, к примеру (см. рис.), разместить их на трех сторонах треугольника, допустим левого; таким образом, вместо трех его сторон мы получим три катушки I, II и III, в которых индуцируются токи со смещением фаз на $1/3$ периода. Мы можем также переместить точки приложения электродвижущих сил и на концы параллельных проводников. Если мы поместим здесь наши катушки, то получим соединение, изображенное на том же рисунке слева. Треугольники, служащие теперь лишь проводящими соединениями для трех левых концов катушек, могут быть стянуты в одну точку. Эти соединения, из которых первое называется «треугольником», а второе — «звездой», широко применяются как в двигателях, так и в генераторах.

Свой первый трехфазный асинхронный двигатель Доливо-Добровольский построил зимой 1889 года. В качестве статора в нем был использован кольцевой якорь машины постоянного тока с 24-мя полузакрытыми пазами. Учитывая ошибки Теслы, Доливо-Добровольский рассредоточил обмотки в пазах по всей окружности статора, что делало более благоприятным распределение магнитного поля. Ротор был цилиндрическим с обмотками «в виде беличьей клетки». Воздушный зазор между ротором и статором составлял всего 1 мм, что по тем временам было смелым решением, так как обычно зазор делали больше. Стержни «беличьей клетки» не имели никакой изоляции. В качестве источника трехфазного тока был использован стандартный генератор постоянного тока, перестроенный в трехфазный генератор так, как это было описано выше.

Впечатление, произведенное первым запуском двигателя на руководство АЭГ, было огромным. Для многих стало очевидно, что долгий тернистый путь создания промышленного электродвигателя наконец пройден до конца.



Способы соединения обмоток генератора в трехфазной цепи

По своим техническим показателям двигателя Доливо-Добровольского превосходили все существовавшие тогда электромоторы — обладая очень высоким КПД, они безотказно работали в любых режимах, были надежны и просты в обращении. Поэтому они сразу получили ши-

рокое распространение по всему миру. С этого времени началось быстрое внедрение электродвигателей во все сферы производства и повсеместная электрификация промышленности.

Источник: Рыжков К.В. 100 великих изобретений. — М.: Вече, 1999. — 528с. — (100 великих).