

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР

В главе, посвященной изобретению телеграфа, уже рассказывалось о том, что в 1820 году было открыто взаимодействие между электрическим током, протекающим в проводнике, и магнитной стрелкой. Это явление было правильно объяснено и обобщено французским физиком Ампером, который установил, что магнитные свойства любого тела являются следствием того, что внутри него протекают замкнутые электрические токи. (Или, говоря современным языком, любой электрический ток создает вокруг проводника магнитное поле.) Таким образом, любые магнитные взаимодействия можно рассматривать как следствия электрических. Однако, если электрический ток вызывает магнитные явления, естественно было предположить, что и магнитные явления могут вызвать появление электрического тока. Долгое время физики в разных странах пытались обнаружить эту зависимость, но терпели неудачу. В самом деле, если, к примеру, рядом с проводником или катушкой лежит постоянный магнит, никакого тока в проводнике не возникает. Но если мы начнем перемещать этот магнит: приближать или удалять его от катушки, вводить и вынимать магнит из нее, то электрический ток в проводнике появляется, и его можно наблюдать в течение всего того периода, во время которого магнит движется. То есть электрический ток может возникать только в переменном магнитном поле. Впервые эту важную закономерность установил в 1831 году английский физик Майкл Фарадей.

Проведя серию опытов, Фарадей открыл, что электрический ток возникает (индуцируется) во всех тех случаях, когда происходит движение проводников относительно друг друга или относительно магнитов. Если вводить магнит в катушку или, что то же самое, перемещать катушку относительно неподвижного

магнита (рис. е) в ней индуцируется ток. Если подвигать одну катушку к другой, через которую проходит электрический ток (рис. ж), в ней также появляется ток. Того же эффекта можно добиться при замыкании и размыкании це-

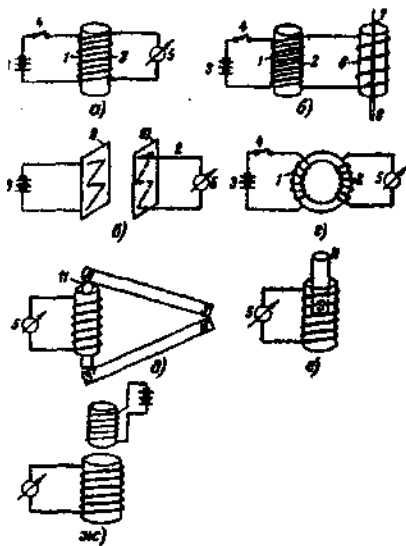


Схема основных опытов Фарадея, которые привели к открытию явления электромагнитной индукции

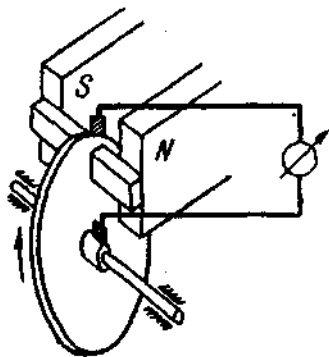
пи, поскольку в момент включения и выключения ток нарастает и убывает в катушке постепенно и создает вокруг нее переменное магнитное поле. Поэтому если поблизости от такой катушки находится другая, не включенная в цепь, в ней возникает электрический ток (рис. в).

Открытие Фарадея имело огромные последствия для техники и всей человеческой истории, так как теперь стало ясно, каким образом механическую энергию превращать в электрическую, а электрическую — обратно в механическую. Первое из этих преобразований легло в основу работы электрогенератора, а второе — электродвигателя. Впрочем, сам факт открытия еще не означал, что все технические задачи на этом пути разрешены: около сорока лет ушло на создание работоспособного генератора и еще двадцать лет на изобретение удовлетворительной модели промышленного электродвигателя. Но главное: принцип действия двух этих важнейших элементов современной цивилизации сделался очевиден именно благодаря открытию явления электромагнитной индукции.

Первый примитивный электрогенератор создал сам Фарадей. Для этого он поместил медный диск между полюсами N и S постоянного магнита. При вращении диска в магнитном поле в нем наводились электрические токи. Если на периферии диска и в его центральной части помещали токоприемники в виде скользящих контактов, то между ними появлялась разность потенциалов, как на гальванической батарее. Замыкая цепь, можно было наблюдать на гальванометре непрерывное прохождение тока.

Установка Фарадея годилась только для демонстраций, но вслед за ней появились первые магнитоэлектрические машины (так стали называть электрогенераторы, в которых использовались постоянные магниты), рассчитанные на создание работающих токов. Самой ранней из них была магнитоэлектрическая машина Пиксии, сконструированная в 1832 году.

Принцип ее действия был очень прост: мимо неподвижных, снабженных сердечниками катушек E и E' двигались посредством кривошипа и зубчатой передачи лежащие против них полюсы подковообразного магнита АВ, вследствие чего в катушках индуцировались токи. Недостатком машины Пиксии было то, что в ней приходилось вращать тяжелые постоянные магниты. В последующем изобретатели обычно заставляли вращаться катушки, оставляя магниты неподвижными. Правда, при этом приходилось решать другую задачу: каким образом отвести во внешнюю цепь ток с вращающихся катушек? Это затруднение, однако, было легко преодолимо. Прежде всего, катушки



"Диск Фарадея" — первый электрогенератор

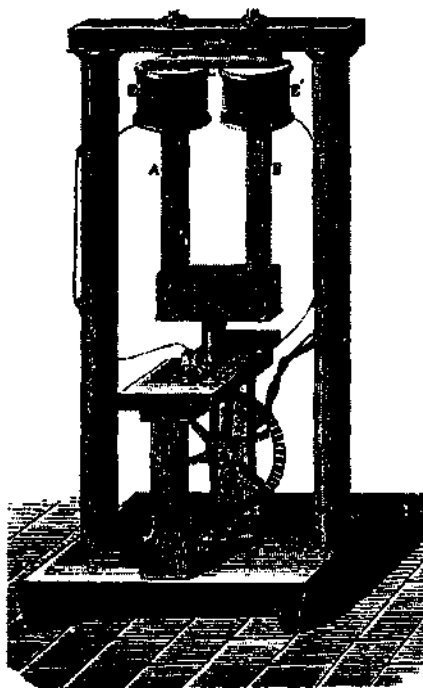
соединяли между собой последовательно одними концами их проводки. Тогда другие концы могли служить полюсами генератора. Их соединяли с внешней цепью при помощи скользящих контактов. Простейший вид такого контакта изображен на рисунке.

Он устроен следующим образом: на оси машины крепились два изолированных металлических кольца B и B' , каждое из которых было соединено с одним из полюсов генератора. По окружности этих колец вращались две плоские металлические пружины V и V' , на которые была заключена внешняя цепь. При таком приспособлении уже не было никаких затруднений от вращения оси машины — ток переходил из оси в пружину в месте их соприкосновения.

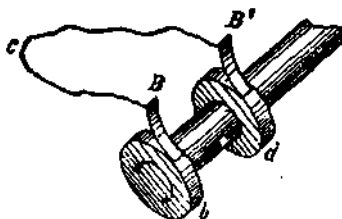
Еще одно неудобство заключалось в самом характере тока электрогенератора. Направление тока в катушках зависит от того, приближаются они к полюсу магнита или удаляются от него. Из этого следует,

что ток, возникающий во вращающемся проводнике, будет не постоянным, а переменным. По мере приближения катушки к одному из полюсов магнита сила тока будет нарастать от нуля до какого-то максимального значения, а затем — по мере удаления — вновь уменьшаться до нуля.

При дальнейшем движении ток изменит свое направление на противоположное и опять будет нарастать до какого-то максимального значения, а потом убывать до нуля. Во время следующих оборотов этот процесс будет по-



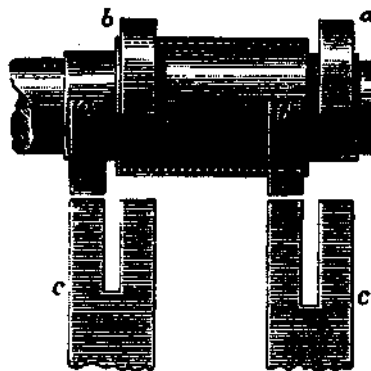
Магнитоэлектрическая машина Пикси для получения переменного тока



Скользящий контакт

вторяются. Итак, в отличие от электрической батареи, электрогенератор создает переменный ток, и с этим приходится считаться.

Как известно, большинство современных электрических приборов созданы таким образом, чтобы питаться от сети переменного тока. Но в XIX веке переменный ток был не удобен по многим причинам, прежде всего психологическим, поскольку в прежние годы привыкли иметь дело с постоянным током: Впрочем, переменный ток можно было легко преобразовать в прерывистый, имеющий одно направление. Для этого достаточно было с помощью специального устройства — коммутатора — изменить контакты таким образом, чтобы скользящая пружина переходила с одного кольца на другой в тот момент, когда ток меняет свое направление. В этом случае один контакт постоянно получал ток одного направления, а другой — противоположного.



Коммутатор

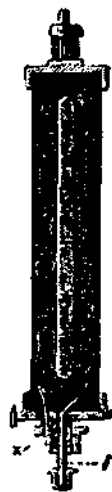
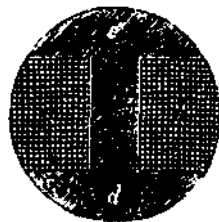
Подобное устройство пружины и контакта кажется, на первый взгляд, очень сложным, на деле же оно очень просто. Каждое кольцо коммутатора делали из двух полуколец, концы которых отчасти заходят друг за друга, а пружины были настолько широкими, что могли скользить по двум рядом помещенным полукольцам. Половины одного и того же кольца помещались на некотором расстоянии друг от друга, но были соединены между собой. Так, полукольцо а, прикасающееся к пружине с, было соединено с полукольцом а', по которому скользила с'; точно так же соединялись между собой б и б', так что при одном полуобороте пружина с, касаясь а, переходила на б, а пружина с' переходила с б' на а'. Не трудно было установить пружину таким образом, чтобы она переходила с одного кольца на другое в тот момент, когда в обмотке катушки менялось направление тока, и тогда каждая пружина все время давала ток одного и того же направления. Другими словами, они представляли из себя постоянные полюса; одна — положительный, другая — отрицательный, в то время как полюса катушек давали переменный ток.

Подобное устройство пружины и контакта кажется, на первый взгляд, очень сложным, на деле же оно очень просто. Каждое кольцо коммутатора делали из двух полуколец, концы которых отчасти заходят друг за друга, а пружины были настолько широкими, что могли скользить по двум рядом помещенным полукольцам. Половины одного и того же кольца помещались на некотором расстоянии друг от друга, но были соединены между собой. Так, полукольцо а, прикасающееся к пружине с, было соединено с полукольцом а', по которому скользила с'; точно так же соединялись между собой б и б', так что при одном полуобороте пружина с, касаясь а, переходила на б, а пружина с' переходила с б' на а'. Не трудно было установить пружину таким образом, чтобы она переходила с одного кольца на другое в тот момент, когда в обмотке катушки менялось направление тока, и тогда каждая пружина все время давала ток одного и того же направления. Другими словами, они представляли из себя постоянные полюса; одна — положительный, другая — отрицательный, в то время как полюса катушек давали переменный ток.

Электрогенератор прерывистого постоянного тока вполне мог заменить неудобную во многих отношениях гальваническую батарею, и потому вызвал большой интерес у тогдашних физиков и предпринимателей. В 1856 году французская фирма «Альянс» даже наладила серийный выпуск больших динамо-машин, приводившихся в действие от парового двигателя. В этих генераторах чугунная станина несла на себе неподвижно укрепленные в несколько рядов подковообразные постоянные магниты, расположенные равномерно

по окружности и радиально по отношению к валу. В промежутках между рядами магнитов на валу были установлены несущие колеса с большим числом катушек. Также на валу был укреплен коллектор с 16-ю металлическими пластинами, изолированными друг от друга и от вала машины. Ток, наводимый в катушках при вращении вала, снимался с коллектора при помощи роликов. Одна такая машина требовала для своего привода паровой двигатель мощностью 6—10 л. с. Большим недостатком генераторов «Альянс» было то, что в них использовались постоянные магниты. Так как магнитное действие стальных магнитов сравнительно невелико, то для получения сильных токов нужно было брать большие магниты и в большом числе. Под действием вибрации сила этих магнитов быстро ослабевала. Вследствие всех этих причин КПД машины всегда оставался очень низким. Но даже с такими недостатками генераторы «Альянса» получили значительное распространение и господствовали на рынке в течение десяти лет, пока их не вытеснили более совершенные машины.

Прежде всего немецкий изобретатель Сименс усовершенствовал движущиеся катушки и их железные сердечники. (Эти катушки с железом внутри получили название «якоря» или «арматуры».) Якорь Сименса в форме «двойного Т» состоял из железного цилиндра, в котором были прорезаны с противоположных сторон два продольных желоба. В желобах помещалась изолированная проволока, которая накладывалась по направлению оси цилиндра. Такой якорь вращался между полюсами магнита, которые тесно его обхватывали. По сравнению с прежними новый якорь представлял большие удобства. Прежде всего, очевидно, что катушка в виде цилиндра, вращающегося вокруг своей оси, в механическом отношении выгоднее катушки, насаженной на вал и вращавшейся вместе с ним. По отношению к магнитным действиям якорь Сименса имел ту выгоду, что давал возможность очень просто увеличить число действующих магнитов (для этого достаточно было удлинить якорь и прибавить несколько новых магнитов). Машина с таким якорем давала гораз-



Якорь Сименса (поперечный и продольный разрез)

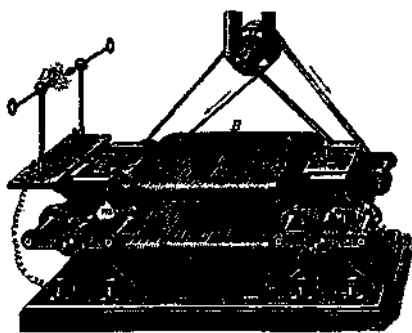
до более равномерный ток, так как цилиндр был плотно окружен полюсами магнитов.

Но эти достоинства не компенсировали главного недостатка всех магнитоэлектрических машин — магнитное поле по-прежнему создавалось в генераторе с помощью постоянных магнитов. Перед многими изобретателями в середине XIX века вставал вопрос: нельзя ли заменить неудобные металлические магниты электрическими? Проблема заключалась в том, что электромагниты сами потребляли электрическую энергию и для их возбуждения требовалась отдельная батарея или, по крайней мере, отдельная магнитоэлектрическая машина. Первое время казалось, что без них невозможно обойтись. В 1866 году Вильде создал удачную модель генератора, в котором металлические магниты были заменены электромагнитами, а их возбуждение вызывала магнитоэлектрическая машина с постоянными магнитами, соединенная с тем же паровым двигателем, который приводил в движение большую машину. Отсюда оставался только один шаг к собственно динамо-машине, которая возбуждает электромагниты своим собственным током.

В том же 1866 году Вернер Сименс открыл принцип самовозбуждения. (Одновременно с ним то же открытие сделали некоторые другие изобретатели.) В январе 1867 года он выступил в Берлинской Академии с докладом «О превращении рабочей силы в электрический ток без применения постоянных магнитов». В общих чертах его открытие заключалось в следующем. Сименс установил, что в каждом электромагните, после того как намагничивающий ток переставал действовать, всегда оставались небольшие следы магнетизма, которые были способны вызвать слабые индукционные токи в катушке, снабженной сердечником из мягкого магнитного железа и вращавшейся между полюсами магнита. Используя эти слабые токи, можно было привести генератор в действие без помощи извне.

Первая динамо-машина, работавшая по принципу самовозбуждения, была создана в 1867 году англичанином Леддом, но в ней еще предусматривалась отдельная катушка для возбуждения электромагнитов.

Машина Ледда состояла из двух плоских электромагнитов, между концами которых вращались два якоря Сименса. Один из якорей давал ток для питания электромагнитов, а другой — для внешней цепи. Слабый остаточный магнетизм сердечников электромагнитов сначала возбуждал очень слабый ток в катушке первого якоря; этот ток обе-



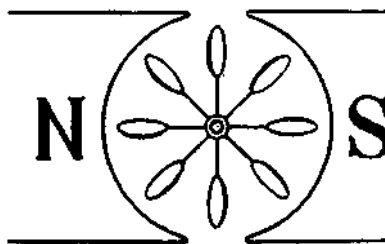
Динамо-машина Ледда, дающая ток на угольные стержни для образования вольтовой дуги

гал электромагниты и усиливал уже имеющееся в них магнитное состояние. Вследствие этого усиливался в свою очередь ток в катушке, а последний еще более увеличивал силу электромагнитов. Мало помалу такое взаимное усиление шло до тех пор, пока электромагниты не приобретали полной своей силы. Тогда можно было привести в движение вторую катушку и получить от нее ток для внешней цепи.

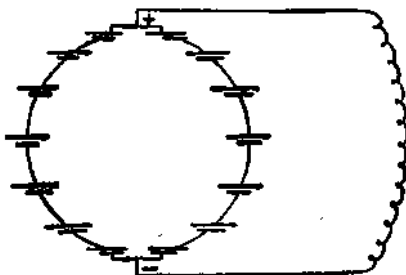
Следующий шаг в совершенствовании динамо-машины был сделан в том направлении, что совершенно устранили одну из катушек и воспользовались другой не только для возбуждения электромагнитов, но и для получения тока во внешней цепи. Для этого нужно было только провести ток из катушки в обмотку электромагнита, рассчитав все так, чтобы последний мог достичь полной своей силы и направить тот же ток во внешнюю цепь. Но при таком упрощении конструкции якорь Сименса оказывался

непригодным, так как при быстрой перемене полярностей, в якоре возбуждались сильные паразитические токи, железо сердечников быстро разогревалось, и это могло при больших токах привести к порче всей машины. Необходима была другая форма якоря, более соответствовавшая новому режиму работы.

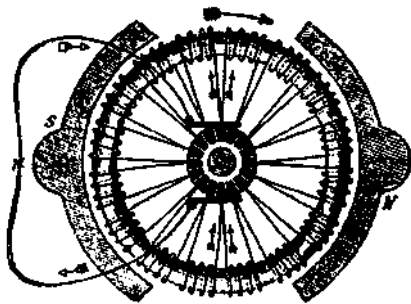
Удачное решение проблемы было вскоре найдено бельгийским изобретателем Зиновием Теофилом Граммом.



Круговое движение кольцевых проводников в магнитном поле



Соединение проводников в обмотке граммовского кольца; отдельные витки заменены символическими элементами



Кольцо Грамма, в котором с каждым сектором коллектора соединены несколько витков обмотки

Он жил во Франции и служил в кампании «Альянс» столярным мастером. Здесь он познакомился с электричеством. Размышляя над усовершенствованием электрогенератора, Грамм в конце концов пришел к мысли заменить якорь Сименса другим, имеющим кольцевую форму. Важное отличие кольцевого якоря (как будет показано ниже) состоит в том, что он не перемагничивается и имеет постоянные полюса. (Грамм пришел к своему открытию самостоятельно, но надо сказать, что еще в 1860 г. итальянский изобретатель Пачинотти во Флоренции построил электрический двигатель с кольцеобразным якорем; впрочем, это открытие вскоре было забыто.)

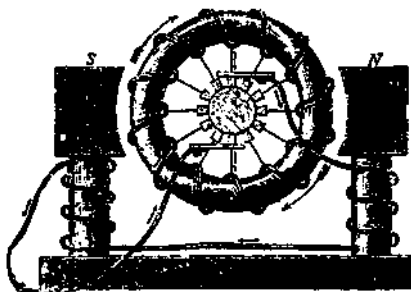
Итак, исходная точка поисков Грамма заключалась в том, чтобы заставить вращаться внутри проволочной катушки железное кольцо, на котором наведены магнитные полюсы и таким образом получить равномерный ток постоянного направления.

Чтобы представить устройство генератора Грамма, рассмотрим сначала следующее приспособление. В магнитном поле, образуемом полюсами N и S, вращаются восемь замкнутых металлических колец, которые прикреплены на равном расстоянии друг от друга к оси при помощи спиц. Обозначим самое верхнее кольцо №1 и будем считать по направлению хода часовой стрелки. Рассмотрим сперва кольца 1-5. Мы видим, что кольцо 1 охватывает наибольшее число силовых линий магнитного поля, так как его плоскость перпендикулярна им. Кольцо 2 охватывает уже меньшее их число, так как оно наклонено к направлению линий, а сквозь кольцо 3 линии вовсе не проходят, так как его плоскость совпадает с их направлением. В кольце 4 число пересекаемых линий увеличивается, но, как легко заметить, они вступают в него уже с противоположной стороны, так как кольцо 4 обращено к полюсу магнита другой своей стороной по сравнению с кольцом 2. Пятое кольцо охватывает столько же линий, сколько первое, но входят они с противоположной стороны. Если мы будем вращать ось, к которой прикреплены кольца, то каждое кольцо будет последовательно проходить через положения 1-5. При этом, при переходе из 1-го положения в 3-е в кольце возникает ток. На пути из положения 3 к 5, если бы силовые линии пересекали кольцо с той же самой стороны, в нем появлялся бы ток противоположный тому, что в положении 1-3, но так как при этом кольцо изменяет свое положение относительно полюса, то есть поворачивается к нему другой стороной, ток в кольце сохраняет то же направление. Зато когда кольцо проходит из положения 5 через 6 и 7 опять к 1, в нем индуцируется ток, противоположный первому.

Заменив теперь наши воображаемые кольца витками вращающейся катушки, плотно намотанной на железное кольцо, мы получим кольцо Грамма, в котором ток будет индуцироваться точно так же, как описано выше. Предположим, что проволока обмотки не имеет изоляции, но железный сердечник покрыт изолирующей оболочкой и ток, индуцируемый в витках проводника, не может проходить в него. Тогда каждый виток спирали будет подобен тому кольцу, что мы рассматривали выше, и витки в каждой половине кольца будут представлять собой последовательно соединенные кольцевые проводни-

ки. Но обе половинки кольца соединены противоположно друг к другу. Значит, токи с обеих сторон направляются к верхней половине кольца, и там, следовательно, получается положительный полюс. Подобным же образом в нижней точке, откуда берут свое направление токи, будет находиться отрицательный полюс. Можно, следовательно, сравнить кольцо с батареей, составленной из двух частей, которые соединены между собой противоположно.

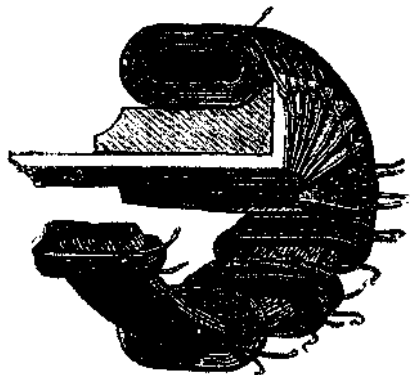
Если теперь соединить противоположные концы кольца, то получится замкнутая цепь постоянного тока. В нашем воображаемом устройстве этого можно легко достичь, укрепив скользящие контакты в виде пружины так, чтобы они касались верхней и нижней части вращающегося кольца и снимали с их



Соединение отдельных оборотов обмотки с центром коллектора

помощью электрический ток. Но в действительности генератор Грамма имел более сложное устройство, поскольку здесь было налицо несколько технических затруднений: с одной стороны, для того чтобы снимать ток с кольца, витки обмотки должны быть обнажены, с другой — для получения сильных токов обмотка должна быть намотана плотно и в несколько слоев. Каким же образом изолировать нижние слои от верхних? На практике кольцо Грамма дополняло особое, довольно сложное устройство, называемое коллектором, которое и служило для отвода токов из обмотки. Коллектор состоял из металлических пластин, прикрепленных к оси кольца и имевших форму секторов цилиндра. Каждая пластина тщательно изолировалась от соседних секторов и от оси кольца.

Концы каждого сектора обмотки были соединены с одной из металлических пластин, а скользящие пружины помещались так, что постоянно находились в соединении с самым верхним и самым нижним секторами обмотки. Из обеих половин обмотки получался постоянный ток, направленный к той пружине, которая была соединена с верхним сектором.



Устройство якоря машины Грамма

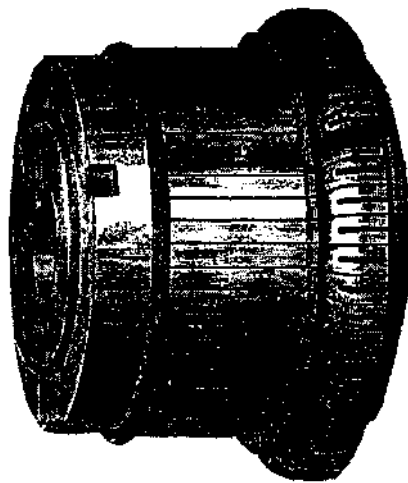
Ток обходил верхнюю цепь и возвращался в кольцо через нижнюю пружину. Таким образом, полюса с поверхности самого кольца переместились на его ось, откуда ток было снимать намного проще.

В таком виде воплотилась первоначальная модель электрогенератора. Однако она оказалась неработоспособной. Как писал Грамм в воспоминаниях о своем изобретении, тут явилась новая сложность: кольцо, на которое был намотан проводник, сильно разогревалось вследствие того, что здесь тоже при быстром вращении генератора индуцировались токи. В результате перегрева изоляция то и дело выходила из строя. Ломая голову над тем, как избежать этой неприятности, Грамм понял, что железный сердечник якоря нельзя делать сплошным, так как в этом случае вредные токи оказываются слишком большими. Но разбив сердечник на части так, чтобы образовались разрывы на пути возникающих токов, можно было сильно уменьшить их вредное действие. Этого можно было добиться, изготовив сердечник не из цельного куска, а из проволоки, налагая ее в виде кольца и тщательно изолируя один слой от другого. На это проволочное кольцо затем навивалась обмотка.

Каждый сектор якоря представлял собой катушку из многих оборотов (слоев). Отдельные катушки соединялись так, что проволока непрерывно обегала железное кольцо и притом в одном и том же направлении. От мест соединения каждой пары катушек шел проводник к соответствующей пластине коллектора. Чем больше было число оборотов катушки, тем большей силы ток можно было снять с кольца.

Изготовленный таким образом якорь устанавливался на ось генератора. Для этого железное кольцо с внутренней стороны снабжалось железными спицами, которые скреплялись с коллектором — массивным кольцом, насаженным на ось машины. Коллектор, как уже говорилось, состоял из отдельных металлических пластин одинаковой ширины. Отдельные слои коллектора были изолированы друг от друга и от оси генератора.

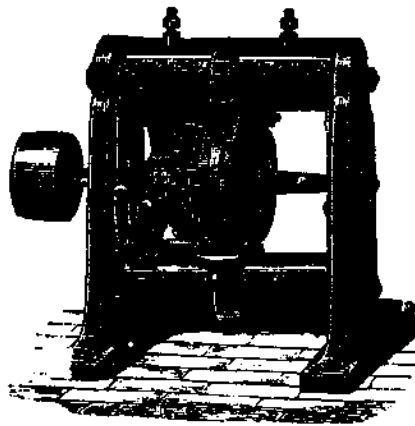
Для снятия тока служили коллекторные щетки, представлявшие собой упругие латунные пластины, плотно прилежавшие к коллектору в надлежащих местах. Они соединялись с зажимами машины, откуда постоянный ток поступал во



Коллектор

внешнюю цепь. Провод, идущий к одному из зажимов, кроме того, образовывал обмотку электромагнитов. Простейшее соединение генератора с обмотками электромагнита можно было получить, соединив один конец обмотки электромагнита с одной из щеток коллектора, например отрицательной. Другой конец обмотки электромагнита подключался к положительной щетке. При таком соединении весь ток генератора проходил через электромагниты.

В целом первая динамомашинная Грамма представляла собой две железные вертикальные стойки, соединенные сверху и снизу стержнями двух электромагнитов. Полюсы этих электромагнитов находились в их середине, так что каждый из них был как бы составлен из двух, одинаковые полюса которых были обращены друг к другу. Можно рассматривать это устройство иначе и считать, что две половины, прилегающие к каждой стойке и



Динамо-машина Грамма

соединенные ею, образовывали два отдельных электромагнита, которые соединялись одноименными полюсами сверху и снизу. В тех местах, где образовывался полюс, к электромагнитам были присоединены особой формы железные насадки, которые входили в пространство между электромагнитами и обхватывали кольцеобразный якорь машины. Две стойки, связывающие оба электромагнита и составлявшие основу всей машины, служили также для того, чтобы держать ось якоря и шкивы машины.

В 1870 году, получив патент на свое изобретение, Грамм образовал «Общество производства магнитоэлектрических машин». Вскоре было налажено серийное производство его генераторов, которые произвели подлинную революцию в электроэнергетике. Обладая всеми достоинствами самовозбуждающихся машин, они вместе с тем были экономичны, имели высокий КПД и обеспечивали практически неизменный по величине ток. Поэтому машины Грамма быстро вытеснили другие электрогенераторы и получили широкое распространение в самых разных отраслях. Тогда только появилась возможность легко и быстро преобразовывать механическую энергию в электричество.

Как уже говорилось, Грамм создавал свой генератор, как динамомашину постоянного тока. Но когда в конце 70-х — начале 80-х годов XIX века резко возрос интерес к переменному току, ему не стоило большого труда переделать его для производства переменного тока. В самом деле, для этого

надо было только заменить коллектор двумя кольцами, по которым скользят пружины. Сначала генераторами переменного тока пользовались только при освещении, но с развитием электрификации они стали получать все большее применение и постепенно вытеснили машины постоянного тока. Первоначальная конструкция генератора также претерпела значительные изменения. Первая машина Грамма была двухполюсной, но в дальнейшем стали применять многополюсные генераторы, в которых обмотка якоря проходила при каждом обороте мимо четырех, шести и более попеременно установленных полюсов электромагнита. В этом случае ток возбуждался не с двух сторон колеса, как раньше, но в каждой части колеса, обращенной к полюсу, и отсюда отводился во внешнюю цепь. Таких мест (а соответственно и щеток) было столько, сколько магнитных полюсов. Затем все щетки положительных полюсов связывались вместе, то есть соединялись параллельно. Точно так же поступали и с отрицательными щетками.

По мере увеличения мощности генераторов возникла новая проблема — каким образом снять ток с вращающегося якоря с наименьшими потерями. Дело в том, что при больших токах щетки начинали искрить. Кроме больших потерь электроэнергии, это оказывало вредное воздействие на работу генератора. Тогда Грамм посчитал рациональным вернуться к самой ранней конструкции электрогенератора, примененной в машине Пиксии: он сделал катушку неподвижной, а вращаться заставил электромагниты, ведь снять ток с неподвижной обмотки было проще. Он поместил катушки якоря на железном неподвижном кольце и заставил электромагниты вращаться внутри него. Отдельные катушки он связал между собой так, чтобы все те катушки, которые в данный момент подвергались одинаковому действию электромагнитов, были соединены последовательно. Таким образом Грамм разбил все катушки на несколько групп и каждую группу употребил для доставления тока в отдельную самостоятельную цепь. Однако возбуждающие ток электромагниты необходимо было питать постоянным током, так как переменный ток не мог вызвать в них неизменной полярности. Поэтому при каждом генераторе переменного тока необходимо было иметь небольшой генератор постоянного тока, откуда ток подводился к электромагнитам при помощи скользящих контактов.

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