

О. Н. ВЕСЕЛОВСКИЙ

МИХАИЛ ОСИПОВИЧ
ДОЛИВО-
ДОБРОВОЛЬСКИЙ

О.Н.Веселовский

МИХАИЛ
ОСИПОВИЧ
ДОЛИВО-
ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Москва · 2021

В мире, где информация приобрела статус одной из главных ценностей, правильная, подходящая, редкая книга — замечательный подарок.

Мы решили запустить проект «Библиотека энергетика», который будет включать в себя книги, рассказывающие о важных исторических событиях и явлениях в отрасли; посвященные выдающимся ученым или написанные личностями, делавшими эту самую историю в свое время.

Переиздание книг — это дань уважения исследователям, желание сохранить первоначальные мысли авторов так, как видели и понимали только они.

Для читателя это возможность открыть для себя новое и по-другому взглянуть на уже известное.

Редкие, но удивительно интересные издания должны, по нашему мнению, быть прочитанными.





«ВЕЛИКИЕ СОБЫТИЯ МОЕЙ ЖИЗНИ —
ЭТО МОИ ПРОИЗВЕДЕНИЯ».

БАЛЬЗАК

ПРЕДИСЛОВИЕ

Имя Михаила Осиповича Доливо-Добровольского принадлежит истории. Его жизнь, охватившая почти четыре десятилетия прошлого и два десятилетия текущего столетий, была насыщена значительными событиями, а его замечательная пионерская деятельность наложила глубокий отпечаток на развитие всей мировой электротехники.

Почти каждое из его многочисленных изобретений могло бы увековечить имя электротехника, а все его изобретения вместе взятые рисуют перед нами образ выдающегося человека, которому подобно волшебнику достаточно было прикоснуться к какому-либо предмету и он становился более совершенным. Но это только внешнее сходство. М.О.Доливо-Добровольский много и упорно работал, неоднократно возвращался к неудавшимся ранее конструкциям, не жалея времени и сил искал решений. Только благодаря своей неистощимой фантазии, неукротимой энергии и поразительной работоспособности добивался он того, что из его рук выходили машины и приборы, аппараты и схемы, все те предметы, которых, казалось, коснулась рука волшебника. Перефразируя известное высказывание Бальзака применительно к М.О.Доливо-Добровольскому, можно сказать о нем, что великие события его жизни — это его изобретения.

В своих трудах Доливо-Добровольский дал замечательные образцы конкретного физического мышления. Главным объектом его исследований являлась физическая сущность процессов и условия, в которых возникают рассматриваемые явления. Он всегда старался

избегать математических усложнений и максимально приблизиться к физическому представлению реальных процессов и закономерностей. Жизнь М.О.Доливо-Добровольского — это научный подвиг, это вдохновенный труд, характеризовавшийся широким русским размахом, ясным пониманием целей науки и производства, глубиной проникновения в самую суть явлений. Много полезного может почерпнуть в его творчестве современная молодежь, которая вступает ныне в науку и включается в производство.

Решить проблему электропередачи удалось, как известно, благодаря развитию техники трехфазного тока, история зарождения и развития которой неразрывно связана с именем М.О.Доливо-Добровольского.

И если многие книги и научные исследования были вполне заслуженно посвящены деятельности ученых и техников, положивших в 70-х и 80-х годах прошлого века начало электротехники, то история возникновения техники трехфазного тока и деятельность ее творца освещены, к сожалению, весьма скромно. Достаточно сказать, что по этому вопросу не было написано ни одной брошюры, не говоря уже о серьезной монографии. Правда, в последнее десятилетие в отечественной и зарубежной (в основном немецкой) периодической литературе было опубликовано немало статей, так или иначе касающихся творчества М.О.Доливо-Добровольского. Но эти статьи, порой не лишенные многих ошибок и неточностей, либо носили явно выраженный биографический характер, либо касались отдельных изобретений и открытий.

Большим затруднением для широких кругов, интересующихся деятельностью Доливо-Добровольского, является то обстоятельство, что большинство его работ и патентов опубликовано в мало-распространенной зарубежной периодике. Лишь пять его статей было опубликовано в сборнике избранных трудов М.О.Доливо-Добровольского, выпущенном Госэнергоиздатом в 1948 г.¹

¹ М. О. Доливо-Добровольский. Избранные труды (о трехфазном токе), Госэнергоиздат, 1948.

В предлагаемой вниманию читателя книге делается первая попытка научно-технического анализа всего творчества М.О.Доливо-Добровольского.

Автор длительное время собирал материалы о М.О.Доливо-Добровольском, о его открытиях и изобретениях. Однако, читая эту книгу, читатель не должен упускать из виду, что Михаил Осипович продолжительное время жил за рубежом, основные свои работы выполнил на заводах берлинской фирмы АЭГ и, по-видимому, в архивах этой фирмы затеряны многие интереснейшие документы, относящиеся к деятельности выдающегося изобретателя. Поэтому автор всегда ощущал недостаточность сведений о процессе творчества Доливо-Добровольского, о его общественно-научной и производственно-технической деятельности, наконец, о его личности. Однако тот материал, который удалось собрать, по мнению автора, дает некоторую, хотя и ограниченную возможность характеризовать жизнь и деятельность М.О.Доливо-Добровольского также и в указанных отношениях. С другой стороны, наличие большого и интересного материала, относящегося непосредственно к его научно-технической, изобретательской деятельности и желание познакомить с ним широкие круги читателей побудили автора написать эту первую книгу о М.О.Доливо-Добровольском.

Собранные сведения автор черпал в опубликованных трудах М.О.Доливо-Добровольского, список которых приведен в приложении, в государственных архивах, в патентах, хранящихся во Всесоюзной патентной библиотеке в Москве и, наконец, в обширной научно-технической литературе, относящейся к интересующему нас периоду.

Самыми достоверными являются, конечно, сведения, заимствованные из опубликованных трудов, архивов и патентов. Некоторая трудность была связана с тем, что многие германские патенты Доливо-Добровольского были взяты на имя фирмы АЭГ, поэтому приходилось разыскивать патенты Доливо-Добровольского, полученные им на свое имя в других странах, и сличать их с германскими, либо искать прямых указаний на номер патента. В приложениях к этой

книге приведен список всех обнаруженных патентов М.О.Доливо-Добровольского. Некоторые сведения, относящиеся главным образом к отдельным моментам биографии М.О.Доливо-Добровольского, любезно сообщили автору проф. М.А.Шателен, лично знавший изобретателя, и проф. Л.Д.Белькинд, разыскавший в 1944 г. в Москве сестру и племянника Михаила Осиповича, а также жену его брата.

Весь материал в книге тематически сгруппирован по главам, но там, где это возможно, автор придерживался хронологической последовательности событий. Лишь собственно биографические сведения с тем, чтобы не было нарушено логики технического развития, сосредоточены в основном, в гл. 1 и 8. Однако по необходимости биографические сведения приводятся частично и в других главах.

Некоторые пояснения, носящие специальный характер, набраны в книге петитом.

В 1917 г. М.О.Доливо-Добровольский опубликовал большую статью «Из истории трехфазного тока» [Л. 37]. В этой статье он достаточно обстоятельно рассказал о своих важнейших работах, хотя и полагал, что он будет недостаточно объективным при описании событий, участником которых был он сам. В этой же статье он предупреждал о трудностях, которые встретит будущий историк в исследовании ранней стадии развития техники трехфазного тока. Действительно, изобретения, публикации, патенты многих изобретателей, относящиеся к многофазной системе, следовали друг за другом с такой быстротой, что трудно было разобраться и оценить заслуги каждого изобретателя, дать правильную оценку тому или иному изобретению. Но самый беспристрастный судья — это время, проверка практикой. И многие из сделанных изобретений в области многофазных систем сегодня забыты или не нашли практического применения вообще, между тем как другие получили в свое время широкое распространение, а некоторые широко используются и в настоящее время.

Автор старался учесть указанное замечание Доливо-Добровольского и по возможности избежать ошибок в освещении истории зарождения, становления и первоначального развития техники

трехфазного тока. Однако даже при той доказательности, к которой стремился автор настоящей работы, последняя не может быть свободной от отдельных неточностей и претендовать на исчерпывающую полноту. Снисходительный читатель вместе с автором должен надеяться на то, что последующие работы, посвященные М.О.Доливо-Добровольскому, пополнят и исправят наши представления о крупнейшем деятеле материальной культуры человечества.

Автор в процессе своей работы пользовался весьма полезными консультациями и советами профессора Московского энергетического института Л.Д.Белькинда и доцента того же института М.С.Михайлова-Микулинского, которым он считает своим приятным долгом выразить глубокую и искреннюю благодарность.

Автор весьма признателен также всему коллективу кафедры Истории техники МЭИ, который всегда проявлял большое внимание к настоящей работе.

Автор с благодарностью примет все замечания по данной работе, которые просит направлять ему по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат.¹

Автор

¹ Произведение печатается по оригинальному тексту 1958 года

«...ЗНАНИЕ ИСТОРИИ ПРЕДМЕТА НЕОБХОДИМО
ДЛЯ ПРАВИЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ВПЕРЕД».

Д.И.МЕНДЕЛЕЕВ

ГЛАВА I

ЮНЫЕ ГОДЫ

Детские годы М.О.Доливо-Добровольского. Обучение в Рижском и Дармштадтском политехнических институтах. Состояние электротехники в 80-х годах XIX в. Первые изобретения. Поступление на службу в компанию АЭГ.

22 апреля 1890 г. на заседании Берлинского электротехнического общества лейпцигский инженер Фёппл выступил с докладом, в котором рассмотрел возможности применения аккумуляторов в установках переменного тока. Считалось, что одним из наиболее существенных недостатков этого рода тока является именно то, что его нельзя так же просто аккумулировать, как это умели делать с постоянным током. Как только Фёппл закончил чтение своего доклада к кафедре подошел высокий, стройный человек, с большим лбом и худощавым лицом, украшенным пышными усами.

Взгляд его круглых, порой едва прищуренных глаз был то твердым, непримиримым, то вдруг смягчался, а чаще всего, когда он начинал говорить, в его глазах светилась ирония. Пластичные, округлые, не отягощенные лишними словами и тщательно подобранные фразы выдавали в нем иностранца, а своеобразный русский акцент не оставлял сомнений в национальности выступавшего. Этот двадцативосьмилетний русский инженер уже три года занимал должность шеф-электрика одной из крупнейших германских электротехниче-

ских компаний, должность, о которой мечтал не один многоопытный, убежденный сединами инженер. Многие из присутствовавших на заседании впервые видели этого человека и слушали его уверенно звучащий голос. Он сделал несколько замечаний по докладу и сообщил о том, что недавно им был построен одноякорный вращающийся преобразователь, отличающийся от известных конструкций машин этого рода. Мало кто мог предполагать, что вскоре этот человек получит мировую известность.

Прошел год, и имя русского инженера М.О.Доливо-Добровольского появилось на страницах специальных журналов и многих газет разных стран мира. В электротехнику, переживавшую бурный период своего развития, пришел новый выдающийся деятель, имя которого сразу же заняло почетное место рядом с такими именами пионеров электротехники, как П.Н.Яблочков, Н.Т.Есла, А.С.Попов, Т.А.Эдисон.



Михаил Осипович Доливо-Добровольский родился 2 января 1862 г. (21 декабря 1861 г. по ст. стилю) в г. Петербурге в дворянской семье [Л. 69]. Отец его, Иосиф Фролович, занимал различные административные должности в Петербурге и Одессе, и, кроме того, с 1877 по 1880 гг. издавал в Одессе местную ежедневную газету. Мать, Ольга Михайловна, урожденная Евреинова, происходила из культурной семьи, члены которой находились в дружеских отношениях с многими известными современниками и были связаны с революционными кругами [Л. 40]. В 1873 г. вся семья переехала на постоянное жительство в Одессу.

В семье Доливо-Добровольских было восемь детей. Михаил был старшим, болезненным ребенком, страдавшим хроническим пороком сердца. Он меньше других своих сверстников резвился, но зато рано пристрастился к чтению сначала детской, беллетристической, а затем и технической литературы. Демократические идеалы и устремления матери, ее «вольные» беседы в кругу друзей не мог-

ли не оказать влияния на формирование мировоззрения впечатлительного юноши.

В 1878 г. Михаил Осипович окончил Одесское реальное училище, и нужно было решить вопрос о выборе высшего учебного заведения. То, что это должно быть техническое учебное заведение, не вызывало никаких сомнений. Михаил Осипович с детства испытывал влечение к физике, химии и, главное, к их практическому применению, к технике. Будучи учеником реального училища, он особенно увлекался химией, устроил у себя дома настоящую лабораторию с множеством пробирок, колб, реактивов и пр. Однажды его опыты даже привели к взрыву, который, к счастью, не вызвал серьезных последствий и заставил юного химика впредь быть более осторожным.

Внимание Михаила Осиповича привлек Рижский политехнический институт, студентом которого он стал 1 сентября 1878 г. Однако окончить этот институт ему не удалось по причинам, имеющим политический характер.

Развитие капитализма в России, начавшееся в 60-х годах прошлого столетия, вывело на политическую арену новую революционную силу — пролетариат. Уже в 70-х годах рабочий класс начинает борьбу сначала за экономические, а в 80-х годах и за политические права. Одесса была первым городом, где в 1875 г. организовался Союз русских рабочих. Через три года был создан «Северный союз русских рабочих». Имена Халтурина и Обнорского передавались из уст в уста революционно настроенными рабочими и интеллигентами. Начались политические выступления студенческой молодежи. Участие студентов в политическом движении особенно усилилось в 1879 и 1880 гг. Представление об обстановке, которая сложилась в эти и последующие годы в высших учебных заведениях, дает сохранившееся в архивах донесение министра народного просвещения барона Николаи, составленное в октябре 1881 г. В этом донесении министр сообщал царю о многочисленных случаях участия студентов в политических выступлениях и предлагал «...постановить правилом, что отныне всякий студент университета

или другого высшего учебного заведения ведомства Министерства народного просвещения, единожды удаленный за обнаруженное участие в каком-либо тайном, противозаконном сообществе, а тем более в какой бы то ни было противоправительственной агитации, в чем бы таковая ни проявлялась, будь она в стенах университета или вне оных, лишается безвозвратно права вновь поступать в какой бы то ни было университет в пределах Российской империи, или в какое бы то ни было другое высшее учебное заведение ведомства народного просвещения» [Л. 70].

15 октября последовало «высочайшее утверждение» этого положения с распространением его на все высшие учебные заведения всех ведомств. Так было официально узаконено существовавшее частично и ранее положение. Многие революционно настроенные студенты лишились в эти годы возможности получить образование. В числе исключенных без права поступления в другие высшие учебные заведения России оказался и М.О.Доливо-Добровольский, который не остался в стороне от революционных выступлений молодежи. Это случилось 22 июня 1881 г.

Перед юношей серьезно встал вопрос о завершении образования. Двери высших учебных заведений России были для него закрыты. Оставался один выход, который в то время использовали многие молодые люди, желавшие либо завершить свое образование, если они находились в положении Доливо-Добровольского, либо пополнить его. Этот выход заключался в поездке за границу.

Доливо-Добровольский для продолжения своего образования избрал Дармштадтское высшее техническое училище. Этот выбор оказался весьма удачным. Небольшой город, бывшая «провинциальная столица» Южной Германии, Дармштадт был известен как важный центр художественно-декоративного производства и машиностроения, а также как город, в котором находился один из наиболее влиятельных в Германии банков. Но действительную славу Дармштадта составило Высшее техническое училище. В этом учебном заведении значительное внимание уделялось практическому применению электричества, и уже в 1881 г. было известно,



Эразм Киттлер (1852–1929).

что в ближайшее время там будет учреждена специальная кафедра электротехники. Действительно, в январе 1883 г. в Дармштадтском высшем техническом училище был впервые в практике высшего образования введен специальный курс электротехники. Преподаванием ее руководил проф. Эразм Киттлер, ставший учителем М.О.Доливо-Добровольского.

Нужно сказать, что слава и само существование Дармштадтского высшего технического училища в значительной степени были обязаны деятельности Киттлера, занявшего в 1882 г. кафедру электротехники [Л. 71]. В 1881/82 учебном году, когда М.О.Доливо-Добровольский поступил в это учебное заведение, оно насчитывало всего 137 студентов. Несмотря на то, что училище пользовалось до этого неплохой репутацией, в 1882 г. при обсуждении бюджета многие депутаты палаты предлагали закрыть его. Лишь 26 голосами против 20 оно было сохранено. Можно себе представить, с ка-

кими трудностями в подобных условиях удалось Киттлеру добиться единовременного пособия и годовой ссуды для организации новой кафедры.

В первое полугодие Киттлер построил свои лекции в виде общедоступных докладов, которые посещались не только студентами, но и многими жителями Дармштадта. Аудитория, в которой читал лекции Киттлер, была всегда переполненной. Он был блестящим лектором, подлинным мастером слова, насыщавшим свои лекции многочисленными примерами. Захватив с первых минут внимание слушателей, он не давал ему рассеяться до конца лекции. Киттлер обладал счастливой способностью прививать слушателям любовь к предмету.

Прекрасно понимая, насколько большое значение в преподавании имеет лабораторная практика, Киттлер всю свою энергию вложил в оборудование электротехнической лаборатории. Последняя была размещена в девяти комнатах общей площадью 290 м². В 1883 г. лаборатория вступила в строй. Первым ассистентом Киттлера был Карл Геринг, позднее ту же должность занимал М.О.Доливо-Добровольский.

Деятельность Э. Киттлера была весьма плодотворной. Он добился того, что в училище выделилось самостоятельное электротехническое отделение с четырехгодичным сроком обучения, выпустившее первых инженеров-электриков. Не имея перед собой других примеров в мировой практике, Киттлер смело и уверенно пролагал путь новой дисциплине, и его имя получило известность далеко за пределами Германии. Дармштадтское высшее техническое училище стало быстро развиваться, строились новые здания, возрастал контингент учащихся: со временем по числу студентов это учебное заведение заняло третье место в Германии.

Прежде чем последовать за Доливо-Добровольским в Дармштадт, попытаемся понять те причины, которые привлекали в то время внимание многих молодых людей к электротехнике. Для этого нам придется вспомнить, в каком состоянии находилась электротехника в 80-х годах прошлого века.

Если изобретение паровой машины и ее внедрение в промышленность сыграли существенную роль в подготовке материально-технической базы капитализма, то возникновение электроэнергетики знаменовало собой зарождение новых производительных сил, переход их на новый качественный уровень. Но еще до того, как стала возможной эта новая промышленная революция, прикладное учение об электричестве, т. е. то, что позднее стало называться электротехникой, должно было пройти значительный и многотрудный путь.

Развитие учения об электрическом токе берет свое начало в открытиях Гальвани и Вольты, в наблюдениях и исследованиях В.В.Петрова, Х.Дэви, Г.Х.Эрстеда, в трудах основоположников электродинамики А.М.Ампера и М.Фарадея. Практические применения электричества и в известном смысле зачатки электропромышленности относятся к периоду замечательного творчества акад. Б.С.Якоби в области электрических машин и гальванопластики. Но только в последнюю треть XIX в. возникают электротехника и электропромышленность в их современном понимании. Этот так называемый «героический период» электротехники, ознаменовавшийся множеством крупнейших изобретений и научных работ в области электричества и магнетизма, начался построением электрического генератора с самовозбуждением [Л. 72] и изобретением П.Н.Яблочковым так называемой электрической свечи. Именно эти два изобретения, относящиеся к 70-м годам XIX в., следует считать началом промышленного этапа электротехники: электрическая машина явилась экономичным источником электроэнергии для получившего сразу же массовое применение надежного источника света — электрической свечи.

Электрические машины и электрические свечи вместе с электротехнической арматурой явились основными предметами производства первых электротехнических предприятий. Рост электротехнической промышленности, возникновение электротехнических

трестов, концернов отражали типичные тенденции в развитии капитализма конца XIX и начала XX вв.

До середины 70-х годов, т. е. до изобретения электрической свечи, электротехника была почти исключительно техникой постоянного тока (телеграфия, сигнализация, гальванопластика). Новые дуговые лампы — электрические свечи Яблочкова вызвали к жизни технику переменного тока, а трансформаторы Яблочкова позволили решить проблему распределения энергии или — по терминологии того времени — проблему дробления света.

После 1881 г., когда широкое распространение получили лампы накаливания и все шире начали применяться для привода рабочих орудий электродвигатели, опять было обращено исключительное внимание на постоянный ток. Интересно в связи с этим отметить, что на Мюнхенской международной электротехнической выставке 1882 г. машины переменного тока были признаны «устаревшими» [Л. 73].

Однако в это же время начала назреть важнейшая энергетическая проблема конца XIX в. — проблема передачи электроэнергии на большие расстояния при централизованном ее производстве. Для решения этой проблемы требовалось повышение напряжения. Но всколыхнувшие весь электротехнический мир знаменитые эксперименты Марселя Де пре не дали непосредственных практических результатов, хотя и представляли несомненный научный интерес. Максимальное напряжение, которое было достигнуто в опытах Де пре, составляло 6000 в, и уже при этом напряжении электрические машины работали ненадежно, их изоляция часто выходила из строя, а к. п. д. электропередачи в этих опытах не превышал 50 %. Не получили существенного развития из-за сложности установок и более поздние работы Фонтена, а затем Тюри. Оба изобретателя предлагали получать высокое напряжение постоянного тока путем последовательного соединения электрических машин.

Положение обострялось еще тем обстоятельством, что в связи с быстрым развитием строительства центральных электростанций, первая из которых была построена Эдисоном в 1882 г. в Нью-

Йорке, стали очевидными затруднения не только в передаче энергии на большие расстояния, но и в распределении электроэнергии в черте города. В то время основным потребителем энергии были лампы накаливания, требовавшие напряжений порядка 100 в. В связи с этим радиус экономичного электроснабжения не мог превышать нескольких сотен метров. Такое положение, с одной стороны, неизбежно тормозило электростроительство, а с другой — стимулировало новые исследования и эксперименты.

Обстановка несколько разрядилась благодаря изобретению в 1882 г. Дж. Гопкинсоном так называемой трехпроводной системы постоянного тока. В установках трехпроводной системы два генератора на электростанции соединялись последовательно, и от точки их соединения шел третий, нейтральный провод. Таким образом, удавалось вдвое повысить напряжение в распределительной сети, причем лампы накаливания обычно включались между одним из крайних и нейтральным проводами, а двигатели можно было включать на повышенное напряжение между крайними проводами, что облегчало поддержание симметричной нагрузки ветвей. Радиус электроснабжения при трехпроводной сети достигал примерно 1,2 км. Были попытки ввести на некоторых станциях даже пятипроводную сеть, что давало увеличение радиуса электроснабжения примерно до 2 км. Однако в дальнейшем развивать многопроводные сети оказалось нецелесообразным, так как сравнительно незначительное увеличение радиуса электроснабжения требовало усложнения установки и увеличения расходов на ее обслуживание. Кроме того, не следует забывать, что многопроводные сети не решали проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния, а служили только сравнительно ограниченной цели увеличения радиуса электроснабжения.

Но когда в 1885 г. были построены, главным образом усилиями известных венгерских электротехников Дери, Блати и Циперновского, трансформаторы с замкнутой магнитной цепью, снова наметился поворот в сторону переменного тока — интерес к переменному току возник опять в связи с трансформаторами, но

определяющим фактором на этот раз явилось уже не распределение, а передача энергии на большие расстояния.

Все эти эволюции сопровождались ожесточенной конкуренцией фирм, борьбой сторонников постоянного и переменного токов. В более трудных условиях находились сторонники переменного тока. Наиболее убедительным аргументом в пользу переменного тока являлась возможность его трансформации, т. е. возможность сравнительно просто получать высокое напряжение в линии передачи. На стороне же приверженцев постоянного тока были многолетний опыт, привычные конструкции машин и аппаратов, стройная теория, которой не приходилось иметь дело с такими мало еще изученными явлениями, как самоиндукция, сдвиг фаз и пр.

Борьба сторонников постоянного и переменного токов в условиях капиталистической конкуренции принимала порой уродливые и даже циничные формы, далеко уходя от научных принципов и подчиняясь закону «бизнеса». Получила, например, широкую известность борьба между двумя ведущими американскими электротехническими фирмами: компанией Эдисона (впоследствии General Electric Company) и компанией Вестингауз (Westinghouse). Эти фирмы не стеснялись никакими средствами борьбы и переносили ее в любые сферы технической и общественной деятельности. Известен, например, нашумевший в свое время процесс Эдисона, защищавшего интересы своей фирмы, против ... переменного тока, т. е. против фирмы Вестингауз. Эдисон внес в сенат штата Виргиния билль, запрещающий применять переменный ток напряжением свыше 200 в. Более того, когда около 1889 г. штат Нью-Йорк решил ввести казнь на электрическом стуле, то и в этом случае бизнесмены от электротехники, по-видимому предполагая, что применение электрических стульев примет широкие масштабы, затеяли циничный спор о достоинствах той или иной системы, того или иного рода тока. Один из инженеров фирмы Эдисона, некий Гарольд Браун, конструировавший электрический стул, в пылу полемики даже публично вызвал Вестингауза младшего на дуэль ... на электрических стульях. «Дуэлянтам», при условии, что каждый из них сядет на стул

другой фирмы, предлагалось в присутствии экспертной комиссии поочередно ступенями поднимать напряжение. Исход «дуэли» должен был решить вопрос конкуренции [Л. 74]. Приведенные примеры, хотя и являются беспрецедентными по своему неприкрытому цинизму, тем не менее достаточно ярко иллюстрируют обстановку в области электротехники, которая складывалась в 80-х годах прошлого века.

В эти годы было построено сравнительно много электростанций переменного тока. Особенно стремительно развивали технику переменного тока будапештская фирма Ганц и фирма Вестингауз. Однако с первых шагов внедрения переменного тока выяснился его существенный недостаток: невозможно было построить удовлетворительный двигатель переменного тока. Пусковой момент двигателей однофазного переменного тока равен нулю, т. е. двигатель не может самостоятельно прийти в движение. Для пуска таких машин необходимо было использовать вспомогательные разгонные двигатели. За неимением лучшего варианта некоторое время так и поступали. Например, широкую известность в конце 80-х годов получили работы английского электрика С. И. Ферранти, который осуществил ряд установок переменного тока в Лондоне и Париже с генераторами оригинальной конструкции, с трансформаторами, повышавшими напряжение до 10 000 в, и с разгонными коллекторными двигателями для пуска синхронных однофазных двигателей. Легко понять, что такие условия не могли удовлетворять промышленное производство, и двигатели переменного тока не могли получить широкого распространения. Следовательно, сфера применения переменного тока ограничивалась электрическим освещением. Но это был уже пройденный этап. Развивавшаяся промышленность все более и более настойчиво требовала совершенствования привода рабочих орудий, т. е. внедрения промышленного электропривода.

80-е годы ознаменовались многими важными исследованиями в области теории электрических машин. В частности, на основе сформулированного Г. Каппом и братьями Гопкинсон так на-

зываемого закона Ома для магнитной цепи был разработан метод расчета магнитной цепи, сохранивший свое значение до настоящего времени. Одним из первых понял и всячески пропагандировал указанный метод М.О.Доливо-Добровольский, хотя значительное число электротехников не поверило в метод Гопкинсонов и Каппа и продолжало проектировать машины грубо эмпирическим способом (с опытными обмотками, которые экспериментально подгонялись под необходимые требования).

Началось глубокое изучение магнитных свойств стали: открытие гистерезиса Варбургом, построение кривых намагничивания Юингом, предложение Штейнметцем эмпирических формул для определения потерь в стали. Изучались и другие вопросы электротехнической теории и практики. Но, как мы увидим ниже, в 80-х годах и в теоретических исследованиях преобладали вопросы цепей постоянного тока, а теория переменного тока делала только первые робкие шаги.

Неудовлетворительным было положение и в области электроизмерительной техники. Нельзя сказать, что в 80-х годах не было хороших и достаточно точных измерительных приборов. Были уже построены вольтметры, магнитоэлектрический гальванометр Дебре и Д`Арсонваля, электромагнитные приборы Гуммеля, тепловые — Кардью, электродинамические — В.Сименса. Но все эти приборы были пригодны главным образом для лабораторных измерений и почти не применялись в качестве щитовых.

Такова была та обстановка, в которой электротехника подошла к трехфазному току. Особенности развития электротехники в рассматриваемый период кратко можно сформулировать следующим образом.

На историческом этапе перерастания домонополистического капитализма в монополистический наметились серьезные противоречия между уровнем производственных возможностей промышленных предприятий и устаревшей, сковывавшей процесс концентрации производства паровой техникой. Всеобщее внимание было обращено к электротехнике, которая развивалась в сложных условиях борьбы противоречивых идей и направлений. Хотя

в 80-х годах и были разработаны многие конструкции электрических машин и аппаратов, хотя была разработана первоначальная теория электротехники, все же основная энергетическая проблема эпохи — проблема передачи энергии на большие расстояния — не была еще решена. В развитии электротехники выявились существенные противоречия. Внедрявшиеся в производство электродвигатели постоянного тока обладали хорошими характеристиками, отвечали всем предъявлявшимся к ним требованиям, но для их питания нужно было строить электростанции либо на территории заводов, либо рядом с ними, т. е. в городе, на дорогой земле. Такие электростанции вызывали своим шумом, копотью и грязью подъездных путей справедливые нарекания городских жителей и властей. Переменный ток не страдал этими недостатками, так как станции могли строиться далеко за чертой города, однако при всех его преимуществах внедрение тормозилось тем, что однофазные электродвигатели не имели пускового момента и останавливались при небольших перегрузках.

80-е годы были эпохой исканий и борьбы различных направлений в развитии электротехники. В то время, как одни инженеры строили более совершенные машины и аппараты, другие из-за непонимания значения переменного тока тормозили его применение. Теория переменного тока еще не была создана. «Отягчающим образом, особенно в отношении переменных токов, — писал позднее Доливо-Добровольский, — влияла недостаточность технических знаний того времени. Не умели рассчитывать даже приближенно машины и простые трансформаторы, а конструкции могли критиковаться лишь после их осуществления» [Л. 37].

Непонимание некоторыми специалистами элементарных вопросов электротехники можно иллюстрировать, например, таким курьезным случаем. В 1887 г. патентное бюро Соединенных Штатов отклонило прошение А. Бернштейна о привилегии на трансформатор на том основании, что, якобы, физически невозможно получать от вторичной обмотки при низком напряжении ток большей силы, чем ток, входящий в первичную обмотку при высоком напряжении [Л. 76].

Еще в 1890 г. видные электротехники делали сравнительные расчеты эффективности канатной, гидравлической, пневматической и электрической передачи энергии, т. е. еще подвергалась сомнению большая экономичность электрической передачи [Л. 75].

Анализ состояния электротехники 80-х годов прошлого века показывает, что в этой области техники возник кризис, определявшийся главным образом трудностями в решении проблемы электропередачи. Это, естественно, не могло не сказываться на общем развитии производительных сил: оторванность источников энергии от центров промышленного производства сдерживала процесс концентрации промышленности. Становилось очевидным, что существовавшие в то время технические средства были недостаточны для того, чтобы выйти из кризиса и удовлетворительно разрешить проблему централизованного производства электроэнергии и передачи ее на большие расстояния. Нужно было новое техническое средство.

Именно эти трудности в электротехнике и ее перспективы приковывали к ней всеобщее внимание. Этим в определенной степени можно объяснить то обстоятельство, что к изучению электротехники обратился М.О.Доливо-Добровольский, которому пришлось решать и которому удалось решить те проблемы, о которых говорилось выше. Его юность совпала с юными годами электротехники.

Вернемся теперь к Доливо-Добровольскому, которого мы оставили в тот момент, когда он стал студентом Дармштадтского высшего технического училища.



В курсе электротехники, преподаванием которой, как указывалось, руководил проф. Киттлер, наибольшее внимание уделялось электрохимии и электрическим измерениям. В учебном плане на электрохимию, например, отводилось 2 ч лекций и 7 ч лабораторных занятий еженедельно. Хорошая подготовка по электрохимии и по электрическим измерениям, которую получали студенты в Дармштадтском высшем техническом училище, приводила обычно к тому,

что инженеры-электрики, окончившие учебное заведение, чаще всего начинали работать именно в этих областях электротехники. Не миновал этого и Доливо-Добровольский, который выполнил первые свои самостоятельные работы и сделал свои первые изобретения именно в области электрохимии и электрических измерений.

Проф. Киттлер, будучи постоянно загруженным частными работами по проверке электротехнических смет, по проектированию и экспертизе электростанций, часто привлекал для выполнения этих работ за соответствующее вознаграждение лучших студентов. Одним из постоянных его ассистентов из числа студентов был и талантливый М.О.Доливо-Добровольский, который своими способностями сразу обратил на себя внимание профессора. Михаил Осипович никогда впоследствии не забывал того влияния, которое оказал на него Э. Киттлер. Будучи уже всемирно известным ученым и инженером, Доливо-Добровольский неоднократно обращался к Киттлеру за советом и всегда с большой благодарностью и уважением вспоминал о своем учителе.

Доливо-Добровольский уже в студенческие годы показал себя незаурядно одаренным, трудолюбивым и чрезвычайно энергичным человеком. Довольно рано он проявил и свои изобретательские способности. Так, в 1881 г. он сделал свое первое изобретение — «кнопка-элемент», детали которого остались неизвестными. Тем не менее это первое изобретение Доливо-Добровольского, по-видимому, представляло определенный интерес, поскольку оно фигурировало в качестве экспоната на Второй Петербургской электротехнической выставке в январе 1882 г. В кратком описании выставки, которое мы находим в журнале «Электричество» за 1882 г., автор считал необходимым упомянуть изобретение Доливо-Добровольского в числе наиболее интересных экспонатов и писал по этому поводу следующее: «Как на новинку, мы можем указать на «кнопку-элемент» г. Доливо-Добровольского; необходимый для электрического звонка гальванический ток получается в этом приборе не от элемента с жидкостью, а от маленького сухого элемента, помещенного под самой кнопкой» [Л. 77]. Из этой краткой заметки можно сделать за-



М. О. Доливо-Добровольский.

ключение, что первое изобретение Доливо-Добровольского представляло собой усовершенствование домашнего звонка, первого электрического устройства, проникшего в быт. Усовершенствование касалось главным образом источника тока — сухого гальванического элемента.

Более подробных сведений о первом изобретении Доливо-Добровольского обнаружить не удалось. Следует заметить, что вообще сведения о юных годах Доливо-Добровольского и его первых работах чрезвычайно скудны и отрывочны.

В студенческие годы Михаил Осипович настолько хорошо изучил электрохимические процессы, что уже в 1884 и 1885 гг. выступил со статьями на страницах журнала «Электричество» [Л. 1–3], в которых не только обнаружил свои прочные знания, но и смело критиковал такого известного немецкого специалиста, каким был в то время проф. Беттхер. Эти первые печатные труды М.О.Доливо-Добровольского в настоящее время представляют интерес главным образом с точки зрения выяснения его научных взглядов.

Лично знавший Доливо-Добровольского проф. Б.И. Угримов сообщал, что, еще будучи студентом, Доливо-Добровольский «предложил впервые пусковую схему для шунтового двигателя постоянного тока, что дало сильнейший толчок делу электропривода на постоянном токе» [Л. 60]. Других указаний на это изобретение обнаружить, к сожалению, не удалось. Вполне возможно, что здесь речь идет об изобретении пускового жидкостного реостата, описанного нами в гл. 7.

В 1884 г. Доливо-Добровольский окончил Дармштадтское высшее техническое училище и занял в нем должность ассистента.

Молодому преподавателю был поручен самостоятельный курс, имевший название: «Электрохимия с особым вниманием к гальванопластике и металлургии». В учебном плане этой дисциплине отводилось еженедельно 2 ч лекции и 3 ч упражнений в течение всего четвертого (старшего) курса. Основными разделами курса были следующие: теория электролиза гальванопластика, электрометаллургия, гальванические батареи и аккумуляторы, электролитический анализ; кроме того, на упражнениях разрабатывались такие темы, как гальванопластические операции; испытания электролитических ванн, выполнение анализа посредством электролиза и т. п.; предполагалось введение химического практикума.

Продолжая совершенствовать свои знания, Доливо-Добровольский тщательно изучает все более или менее значительные работы в области электротехники, детально знакомится с электротехнической литературой, издававшейся на всех основных языках Европы. Его внимание в этот период начинает особенно привлекать так называемая английская школа электротехников, которая именно тогда разрабатывала основные принципы конструирования электрических машин (бр. Гопкинсон, Мордей и др.).

К этому времени стало ясно, что в связи с огромным ростом электротехнической литературы было уже трудно, а порой и невозможно регулярно следить за всеми ее новинками. Поэтому с большим сочувствием и благодарностью встретили электрики инициативу Карла ШТРЕККЕРА, который взялся за организацию систематиче-

ского издания реферативных сборников по электротехнике. К работе в этих сборниках ШТРЕККЕР привлек крупных специалистов, а отдел электрохимии поручил М.О.Доливо-Добровольскому. Подготовительная работа была проведена в 1886–1887 гг., и первый сборник вышел в свет в 1888 г. Это издание получило наименование «Прогресс электротехники» («Fortschritt der Elektrotechnik»). Авторы сборников ставили перед собой задачу «...дать полное собрание всех статей, трактатов, рассуждений и описаний из области научной и практической электротехники в издаваемых ежеквартально выпусках. Эти выпуски имеют следующие основные разделы, из которых каждый разбит еще на подразделы: А. Электромеханика; В. Электрохимия; С. Электрическая связь и сигнализация; D. Измерения и научные исследования; Е. Токи в земле и атмосферное электричество» [Л. 78]. Сборники «Прогресс электротехники», издававшиеся несколько десятков лет, представляли, безусловно, большую ценность для специалистов.

В литературе имеются сведения еще о двух ранних изобретениях Доливо-Добровольского. Первое из них представляло собой попытку продолжить и развить работы П.Н.Яблочкова по созданию так называемых топливных элементов (элементов горения). Яблочков в 1876–1881 гг. систематически изучал возможность получения электрической энергии непосредственно при горении угля, т. е. ставил задачу устранить при преобразовании тепловой энергии в электрическую такое неэкономичное звено, как паровая машина [Л. 79]. Еще будучи студентом, в 1883 г., т. е. вслед за работами Яблочкова, Доливо-Добровольский построил элемент, в котором энергия холодного горения каменноугольного (светильного) газа в атмосферном воздухе преобразовывалась в электрическую энергию. Об этой его работе сообщил позднее упоминавшийся нами уже ассистент проф. Киттлера Карл Геринг [Л. 80].

Отсутствие чертежей и слишком краткое описание не позволяют точно установить суть изобретения. Нужно заметить, что «элементы горения», сконструированные как Яблочковым, так и Доливо-Добровольским, не имели практического значения и представля-

ли только научный интерес. Однако попытки построить топливный элемент продолжались еще много позже (например, опыты доктора Боршерса в 1894 г.) и не утратили своего научного значения до настоящего времени.

Вторым изобретением Михаила Осиповича, сущности которого, к сожалению, также не удалось установить, является разработка в 80-х годах способа электролитического получения алюминия из его окиси при высокой температуре [Л. 57 и 65].

Знакомство с рассмотренными выше трудами Доливо-Добровольского показывает, что, обучаясь и работая в Дармштадтском высшем техническом училище, он сформировался как специалист в области электрохимии. Нужно полагать, что он пользовался авторитетом в кругу специалистов, поскольку ему доверили преподавание одного из основных курсов в передовом высшем учебном заведении.

В 1887 г. произошли существенные изменения в жизни и деятельности М.О.Доливо-Добровольского. В этом году молодой и талантливый инженер был приглашен на работу фирмой Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (сокращенно AEG), или, как эту фирму называли в России, Всеобщей компанией электричества (сокращенно ВКЭ или АЭГ).

Попробуем представить себе ту обстановку и те условия, в которые попал Доливо-Добровольский, приняв это предложение.

К 70-м годам прошлого века в результате борьбы немецкой буржуазии за политическое и экономическое объединение страны и благодаря энергичной деятельности Бисмарка, проводившего политику объединения страны «сверху», Германия превратилась в единое и сильное государство. Проведя ряд мероприятий по установлению протекционистских тарифов на важнейшие виды промышленной и сельскохозяйственной продукции, Бисмарк обеспечил беспрепятственное развитие крупной капиталистической промышленности. В 80-х годах начался усиленный процесс концентрации капитала, и бывшая незадолго до этого разрозненной юнкерски-помещичьей страной, Германия в начале 90-х годов уже обогнала Францию и по

объему промышленной продукции стала приближаться к Англии. Германский капитализм превращался в империализм. Таково было проявление закона неравномерности экономического и политического развития капитализма.

Фирма АЭГ представляла собой типичный пример крупного монополистического объединения, его роста и укрепления. Краткая история возникновения этой фирмы такова [Л. 81].

В 1881 г. энергичный и предприимчивый немецкий инженер Эмиль Ратенау посетил Всемирную электротехническую выставку в Париже, центральным экспонатом которой являлась лампа накаливания. Ратенау сумел оценить возможности, заложенные в новом способе электрического освещения, и предвидел большую будущность ламп накаливания. Заключив контракты с рядом небольших фирм и с Парижской континентальной компанией Эдисона, он в 1882 г. основал в Берлине «Общество для применения электрических ламп накаливания». Опасаясь рискованной борьбы с безгранично господствовавшей на германском электротехническом рынке фирмой Сименс и Гальске, Ратенау решил пойти на заключение системы договоров и с этой фирмой. Так на базе объединенного капитала в 5 млн. марок была создана и в 1883 г. официально зарегистрирована «Германская Эдисоновская компания». Следует отдать должное первому бессменному генеральному директору фирмы Ратенау, который занимался не только коммерческими операциями, но и умело подбирал для фирмы специалистов. Так, во главе технического руководства новой электротехнической фирмой встал талантливый инженер Оскар Миллер, убежденный сторонник как технического, так и социального прогресса.

В 1884 г. у Компании появилось первое дочернее предприятие — Берлинские электростанции. В 1887 г. фирма сумела откупиться от Эдисоновской континентальной компании и была переименована в АЭГ. В этом же году главным электриком (шеф-электриком) ее стал М.О.Доливо-Добровольский.

В 1894 г. АЭГ расторгла за громадное возмещение договор с фирмой Сименс и Гальске, а к 1900 г. она уже успела поглотить

такие крупные компании, как «Унион», фирму Ламейера, «Фельтен и Гильом» (основанную в 1826 г.) и ряд других. Капитал АЭГ к этому времени возрос до 57 млн. марок.

Влияние и масштабы фирмы очень быстро расширялись. В начале текущего столетия она по данным, приведенным В.И. Лениным, господствовала по системе «участий» уже над 175–200 обществами и распоряжалась общей суммой капитала приблизительно в 1,5 млрд. марок [Л. 82]. В 1907 г. между АЭГ и американской фирмой General Electric Company был заключен договор о разделе мира.

Именно в период быстрого развития фирмы и начал свою инженерную деятельность Доливо-Добровольский. Перед ним открывались широкие возможности приложить свои знания и способности во внешне благоприятных условиях развивавшейся электротехнической фирмы.

Вначале Доливо-Добровольский, сохраняя за собой общее техническое руководство, особое внимание уделял конструированию аккумуляторов. Здесь еще сказывалась его приверженность к работам в области электрохимии. Аккумуляторы, которыми он занимался, в большом количестве требовались для электрических станций, особенно станций постоянного тока. Генераторы на этих станциях включались параллельно с аккумуляторами. Последние покрывали пики нагрузки и питали сеть в дневные часы, так как подавляющий процент нагрузки составляли осветительные приборы, которые днем работали очень мало. Доливо-Добровольскому на заводах фирмы неизбежно пришлось заняться также вопросами проектирования и производства электрических машин, аппаратов и приборов. В этой области он также достиг высокой степени совершенства. Достаточно указать, что в конце 80-х годов, когда теоретические вопросы электромашиностроения находились еще в стадии становления, М.О. Доливо-Добровольский строил машины, расчетные и экспериментальные параметры которых совпадали с точностью до 2,5–5 % [Л. 83].

В первый же период своей деятельности у фирмы АЭГ Доливо-Добровольский сделал ряд интересных и важных изобретений, с ко-

торами мы познакомимся ниже. Здесь же, в стенах заводов фирмы родилась целая серия изобретений, относящихся к системе трехфазного тока, изобретений, ставших главным делом жизни Доливо-Добровольского. Вместе с этими изобретениями начался новый этап в развитии фирмы АЭГ, оказавшейся монопольной обладательницей важнейших патентов в области новой системы тока. Вместе с этими изобретениями начинается и наиболее интересная страница в жизни М.О.Доливо-Добровольского.

Рождение техники трехфазного тока ознаменовало собой начало новой, современной эпохи в развитии электротехники. Так, одновременно мужали электротехника и один из ее творцов, наш соотечественник М.О.Доливо-Добровольский. Прошли юные годы. И трудно решить, что было бы более правильно: сказать, что вместе с электротехникой Доливо-Добровольский вступил в зрелый возраст или электротехника вступила в зрелый возраст вместе с Доливо-Добровольским.

«...ИСТОРИЯ, КАК НА ДНЕ ПРОМЫВАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ,
СОХРАНЯЕТ НЕМНОГИЕ КРУПИНКИ ЗОЛОТА —
ДОСТИЖЕНИЯ ПЕРВОСТЕПЕННОЙ ВАЖНОСТИ И ВЕЧНОГО
ЗНАЧЕНИЯ. ВСЕ ОСТАЛЬНОЕ ЕЕ БУРНЫЙ ПОТОК УНОСИТ —
И ФАКТЫ, И ИМЕНА, И ДАТЫ...»

Т.П.КРАВЕЦ

ГЛАВА II

ПРЕДЫСТОРИЯ

МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ

Открытие явления вращающегося магнитного поля. Машины с искусственной фазой. Синхронные многофазные машины. Работы Н. Тесла в области многофазных систем. Двухфазная система токов.

Выступая в 1900 г. на Первом Всероссийском электротехническом съезде, М.О.Доливо-Добровольский справедливо заметил, что годом рождения трехфазного тока следует считать 1891 г. В этом году на Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне (Германия) в широких масштабах и с триумфом были продемонстрированы возможности техники трехфазного тока.

Было бы ошибочным, однако, полагать, — если это вообще возможно сделать, — что техника трехфазного тока возникла, так сказать, «на пустом месте», что до замечательной инженерно-научной деятельности Доливо-Добровольского не было никаких работ, сыгравших ту или иную роль в деле разработки многофазных систем. Возникновение техники трехфазного тока, изобретения Доливо-Добровольского были подготовлены как развитием электротехники,

так и — в более широком смысле — всем развитием общественного производства. Выше уже указывалось, что уровень производительных сил к концу XIX в. поднялся до такой степени, когда необходимость решения проблемы концентрированной выработки электроэнергии в местах дешевых энергетических источников и передачи этой энергии в места ее потребления неумолимо диктовалась развитием общественного производства. Но раз эта задача была поставлена историей, она неминуемо должна была найти свое решение.

Каковы же были научно-технические предпосылки, каковы были материальные условия возникновения техники трехфазного тока? Иначе говоря, какова ранняя история многофазных систем?

Из изучения состояния электротехники в 80-х годах прошлого века можно сделать очевидный вывод, что дальнейший прогресс мог быть достигнут двумя путями: либо найти способ легко изменять напряжение постоянного тока и тем самым решить проблему электропередачи, либо изобрести удовлетворительный двигатель переменного тока. Более перспективным и более легко осуществимым оказалось второе. Читатель помнит, что основным недостатком двигателей переменного тока являлось отсутствие у них пускового момента. Начальный вращающий момент у двигателя переменного тока может возникнуть при условии создания вращающегося магнитного поля. Принцип вращающегося магнитного поля положен в основу работы бесколлекторных машин переменного тока. Таким образом, ранняя история многофазных систем, характерной особенностью которой является возможность создавать вращающиеся магнитные поля, есть прежде всего история открытия самого принципа вращающегося магнитного поля.

Поиски истоков работ в области вращающихся магнитных полей приводят нас к 20-м годам прошлого столетия.

Есть указания [Л. 84], что еще до начала 20-х годов прошлого века неоднократно наблюдалось тормозящее влияние медного корпуса компаса на колебания магнитной стрелки или другие явления взаимодействия между немагнитными металлами и магнитной стрелкой при их взаимных перемещениях. Но наиболее интересный опыт,

ставший историческим, продемонстрировал в Парижской Академии 22 ноября 1824 г. французский физик Франсуа Доменик Араго. Он показал, что если над укрепленным на вертикальной оси медным диском вращать постоянный магнит, то диск также начинает вращаться. То, что при этом не происходит никаких обычных магнитных явлений притяжения или отталкивания, обнаруживалось тотчас же, как только прекращалось вращение магнита: в состоянии покоя нельзя было наблюдать никаких явлений взаимодействия между диском и магнитом. Этому явлению, названному тогда «магнетизмом вращения», в котором в зародышевой форме был заключен принцип асинхронного электродвигателя, многие ученые пытались дать скольконибудь удовлетворительное объяснение. Однако легко понять, что объяснить явление Араго стало возможным только после открытия М. Фарадеем в 1831 г. явления электромагнитной индукции [Л. 85].

Опытами Араго был установлен тот важный факт, что проводящее тело может совершать механическую работу, если его поместить во вращающееся магнитное поле. Однако, как видно из описания опыта, Араго получал вращающееся поле при помощи *вращающегося* постоянного магнита, тогда как в индукционных электродвигателях вращающееся магнитное поле создается при помощи *неподвижной* системы обмоток, расположенной на статоре. Поэтому, анализируя историю открытия вращающегося магнитного поля, мы должны найти первую работу, в которой описано получение вращающегося магнитного поля при помощи неподвижного устройства. Такая работа появилась спустя 55 лет после опытов Араго.

28 июня 1879 г. английский ученый Уолтер Бейли сделал Лондонскому физическому обществу доклад на тему: «Способ получения вращения Араго» [Л. 86]. Доклад сопровождался демонстрацией прибора (рис. 2-1). На деревянной подставке вертикально установлены четыре стержневых электромагнита, каждый из которых имел по 150 витков изолированной проволоки диаметром 2,5 мм. Высота каждого электромагнита составляла около 100 мм. Между прибором и источником тока включался коммутатор, приводившийся в движение от руки. Конструкция коммутатора была такова, что при его

вращении в обмотки электромагнитов в определенной последовательности направлялись импульсы постоянного тока. При этом верхние концы сердечников поочередно получали северную или южную полярность.

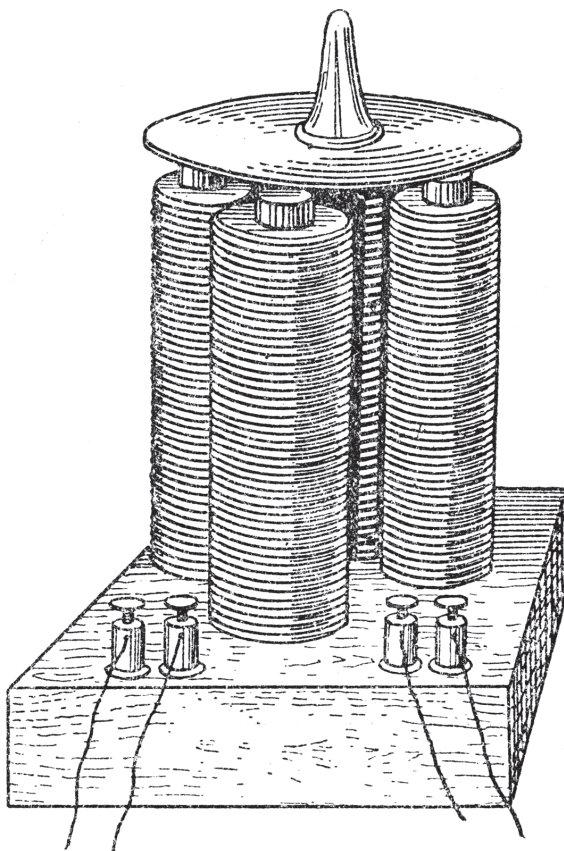


Рис. 2—1. *Прибор Бейли.*

В приборе Бейли достигалось шаговое перемещение магнитного поля, и это было аналогично движению постоянного магнита вокруг вертикальной оси. Вполне естественно, что диск начинал вращаться на оси. Диаметр диска в приборе Бейли составлял 60 мм.

Бейли указывал, что при помощи коммутатора между полюсами электромагнитов создавалось «прерывистое вращение поля», но тут же он замечал, что в предельном случае, если число электромагнитов бесконечно, можно было бы получить равномерное вращение магнитного поля. Описанное устройство было настолько технически несовершенным, что прибор Бейли, не получив никакого применения, остался физической игрушкой.

Более совершенный путь к получению вращающегося магнитного поля наметился в установках синхронной связи М. Дебре. Его работы в этом направлении составляют некоторое связующее звено между опытами Бейли, оперировавшего с импульсами постоянного тока, и трудами более поздних авторов, создававших вращающиеся поля при помощи многофазных токов.

В 1879 г., т. е. одновременно с Бейли, Дебре построил модель устройства для синхронной передачи движения. Статью «Об электрическом синхронизме любых двух движений» он опубликовал в 1880 г. [Л. 87].

В этой первой статье Дебре описал принцип получения синхронной связи двух движений, однако в отношении получения пространственного перемещения магнитного поля Дебре ни на шаг не продвинулся в сравнении с Бейли. Значительно интереснее была следующая работа Дебре, опубликованная в 1883 г. [Л. 88].

Дебре поставил перед собой следующую задачу: «Пусть даны два тела, обладающие каждое определенным вращательным движением вокруг одной и той же оси; найти способ воспроизвести их относительные смещения одновременно в каком-либо числе различных удаленных точек, получив абсолютный синхронизм».

Для решения поставленной задачи Дебре предложил схему устройства, которую он, к сожалению, не иллюстрировал соответствующим рисунком в своей статье. Однако, по достаточно ясному описанию эта схема может быть представлена рис. 2-2. Кольцевой якорь может вращаться между полюсами постоянного магнита NS. На коллекторе расположены две пары щеток, осевые линии которых взаимно-перпендикулярны. Выводы от щеток соединены с четырьмя

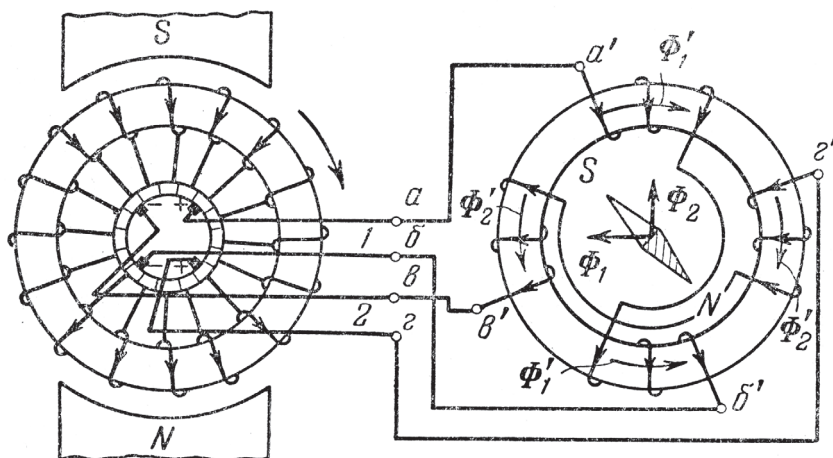


Рис. 2—2. Схема синхронной передачи движения, предложенная Дебре.

проводами, ведущими к прибору, который Дебре изобрел еще в конце 1881 г. и назвал «кольцевым уравнивателем токов». Этот прибор, выполненный в виде кольца, имеет две секционированные обмотки, секции которых, как указывает автор, «прилегают к концам двух взаимно-перпендикулярных диаметров». Таким образом, генератор постоянного тока с одной парой полюсов и двумя парами щеток являлся датчиком в установке синхронной связи Дебре. Напряжения на каждой паре щеток, очевидно, зависят от положения этих щеток относительно нейтрали машины (при совпадении линии щеток с нейтралью напряжение на данной паре щеток максимально), или, что в принципе то же самое, указанные напряжения зависят при неподвижных щетках от положения полюсов NS относительно этих щеток.

Для указанного на рис. 2-2 взаимного размещения частей машины и при вращении якоря по стрелке направления токов и полярности щеток будут такие, как указано на схеме, причем напряжения на каждой паре щеток ($a - б$ и $в - г$) для данного симметричного положения будут одинаковы. При указанной схеме соединений в кольце «уравнивателя» возникают магнитные потоки Φ_1' и Φ_2' , а в центре кольца два взаимно-перпендикулярных потока Φ_1 и Φ_2 . Если в центре

кольца поместить магнитную стрелку, то она установится в направлении результирующей этих потоков.

Теперь Дебре предлагает повернуть на определенный угол относительно всей системы полюса машины NS и утверждает, что стрелка в «уравнителе» повернется ровно на такой же угол. Действительно, рассмотрим рис. 2-3. Если ось полюсов совместить с осью щеток $a - б$ и считать это положение начальным 1, то очевидно, что на щетках $a - б$ напряжение будет равно нулю, а на щетках $в - г$ оно будет максимальным. Если теперь равномерно поворачивать полюса машины, переходя последовательно в положения 2, 3, 4, ..., то напряжение на щетках $a - б$ будет расти, а на щетках $в - г$ — уменьшаться.

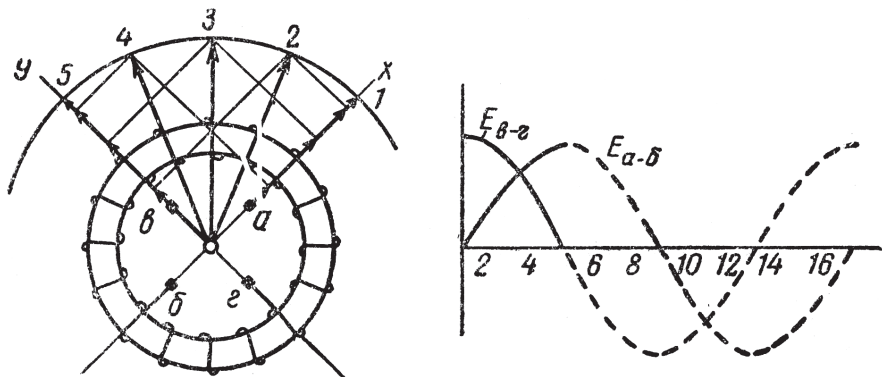


Рис. 2—3. Схема получения двухфазных токов.

Напряжение на щетках $a - б$ будет изменяться в соответствии с изменением составляющей вектора потока по оси Y , а напряжение на щетках $в - г$ — в соответствии с изменением составляющей по оси X . Легко понять, что эти изменения будут происходить по синусоидальному закону. Таким образом, каждому положению оси полюсов будет соответствовать строго определенное соотношение напряжений на соответствующих щетках и токов в цепях 1 и 2, а следовательно, и потоков Φ_1 и Φ_2 в «уравнителе». Результирующая потоков в кольце «уравнителя» будет «следить» за перемещением

линии полюсов датчика. Задача, поставленная Депре, оказалась решенной, так как была получена синхронная связь двух движений. Депре предложил использовать свою систему для передачи показаний курса корабля, чего можно достичь, расположив вращающийся кольцевой якорь на вершине мачты; роль полюсов магнита будут играть магнитные полюса земли.

Депре подошел вплотную к открытию вращающегося магнитного поля, получаемого при помощи двухфазного тока. Действительно, при равномерном вращении оси полюсов датчика можно получить синусоидальное изменение двух э. д. с., сдвинутых по фазе на 90° (рис. 2-3). А если, далее, заменить в «уравнителе» магнитную стрелку, например, медным цилиндром, то получится асинхронный двигатель. Депре, решая конкретную задачу, ограничил в своем устройстве процесс, так сказать, «поворачивающимся» полем.

Одновременно с синхронными устройствами Депре и несколько позднее появились другие приборы, в которых использовались токи, различающиеся по фазе. Однако физика процессов еще не была выяснена, многочисленные опыты носили характер случайных находок и не останавливали на себе внимания электротехников. Так, очень близок к открытию явления вращающегося поля, создаваемого при помощи искусственной фазы, был известный американский электрик И. Томсон. Он в 1887 г. строил так называемые репульсионные двигатели и приводил в движение медные диски в поле переменного тока с экранами из полос меди. Он даже заметил, что индуцируемый в медных пластинах ток запаздывает по времени, но все же не сумел найти правильного объяснения наблюдавшимся явлениям. Восхищение Доливо-Добровольского вызвала следующая замечательная фраза Томсона: «Трудно составить такую комбинацию из электромагнитов, обмотки которых обтекаются переменным током, и кусков меди, которая не имела бы тенденции к вращению» [Л. 37].

Можно было бы назвать и некоторые другие работы, в которых описывались приборы, основанные фактически на использовании свойств вращающегося магнитного поля (счетчики Бореля, Шалленбергера). И все же вплоть до 1888 г. никому не удалось в ясной



Галилео Феррарис (1847–1897).

и строгой форме описать существо явления вращающегося магнитного поля, создаваемого при помощи переменных токов. Только в указанном году это было сделано независимо друг от друга итальянским физиком Г.ФЕРРАРИСОМ и сербским инженером и ученым Н.ТЕСЛА.

Если работа Феррариса носит характер специального теоретического исследования, то для трудов Тесла характерны удивительное богатство идей и множество предлагаемых конструкций, хотя далеко не все они были удачными. Несмотря на то, что работы Феррариса и Тесла были опубликованы практически одновременно, а патенты

Тесла были заявлены даже на полгода раньше, мы рассмотрим труды Тесла несколько позднее, так как по своему содержанию они представляют более высокий этап в развитии многофазных систем.

18 марта 1888 г. проф. Галилео Феррарис выступил в Туринской академии наук с большим докладом на тему: «Электродинамическое вращение, производимое посредством переменных токов» [Л. 89]. С работой Феррариса следует познакомиться более подробно, во-первых, потому, что она заложила научные основы новой системы электрических токов и, во-вторых, потому, что именно эта работа побудила к исследованиям многофазной системы М.О.Доливо-Добровольского.

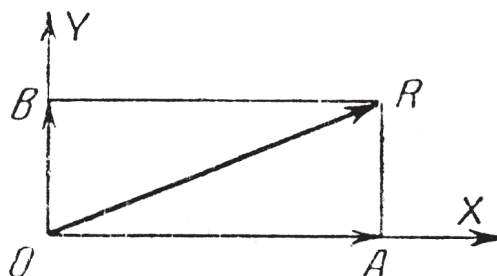


Рис. 2—4. Векторная диаграмма Феррариса.

Свое исследование Феррарис начинает с рассмотрения двух гармонически изменяющихся магнитных полей, которые складываются в точке O (рис. 2-4). Пространственный угол между векторами этих полей составляет 90° . Для момента времени, когда индукция одного поля в точке O изображается отрезком OA , а другого — OB , суммарная индукция изобразится отрезком OR . При изменениях OA и OB точка R перемещается по кривой, форма которой определяется законами изменений индукций двух рассматриваемых полей. Индукция в точке O создается двумя катушками, обтекаемыми переменными токами. Легко показать, что если два тока, создающие намагничивающие силы вдоль осей X и Y , синусоидальны, имеют одинаковые периоды и амплитуды, то при разности фаз между ними,

равной нулю или кратной π , геометрическим местом точки R будет прямая линия, а при любой другой разности фаз — эллипс. В частном случае, когда разность фаз равна четверти периода (90°) геометрическим местом точки R будет окружность. Иначе говоря, в последнем случае вектор суммарной магнитной индукции получает непрерывное вращательное движение, не изменяясь, однако, по абсолютной величине. Феррарис подчеркивает, что направление вращения изменится, если фазу одного из токов изменить на 180° .

Таким образом, Феррарис дал совершенно четкое и математически строгое описание явления вращающегося магнитного поля, создаваемого при помощи двух переменных токов. Здесь же он впервые пользуется и самим термином «вращающееся магнитное поле».

Сформулировав указанные представления, Феррарис ставит перед собой задачу получить два таких тока, которые необходимы для создания вращающегося поля. Оказалось, что два различных по фазе тока можно получить, пользуясь обычной сетью однофазного переменного тока. Феррарис говорит: «Описанный выше эффект может быть получен посредством одного переменного тока». Как же это можно сделать? При помощи так называемого «расщепления фаз», или, другими словами, путем введения искусственной фазы. Так Феррарис положил начало отдельному направлению в развитии индукционных электродвигателей — двигателей с вспомогательной или искусственной фазой. На такие двигатели, как мы увидим ниже, некоторое время возлагались очень большие надежды, им в противовес двигателям трехфазного тока пророчили большое будущее и, несмотря на то, что решающую победу впоследствии в системе промышленного привода одержали трехфазные двигатели, в однофазных сетях и в схемах автоматизации и управления и в настоящее время применяются двигатели с искусственной фазой.

Первый метод получения двух различающихся по фазе токов, которым пользовался Феррарис, состоял в следующем. Одна из двух взаимно-перпендикулярных катушек (оси которых совпадали с осями X и Y в рассмотренном выше случае) включалась в первичную цепь трансформатора, а другая — во вторичную. Феррарис исполь-

зовал трансформаторы Голяра и Гиббса, которые, как известно, имели разомкнутую магнитную цепь. В связи с этим намагничивающий ток имел значительную величину и при небольшой нагрузке трансформатора разность фаз первичного и вторичного токов была несколько больше 90° . Феррарис опытным путем подбирал величину омического сопротивления, которое он дополнительно вводил во вторичную цепь, имея в виду приблизить указанный угол к 90° . Также опытным путем он подбирал соотношение чисел витков обеих катушек с тем, чтобы получить по возможности равные магнитные потоки, создаваемые каждой катушкой.

В другом случае Феррарис предлагал использовать две параллельные цепи однофазного переменного тока, в одну из которых включалось активное сопротивление, а в другую — катушка с малым активным сопротивлением, но большой индуктивностью. Фазный сдвиг в этом случае был всегда меньше 90° . Следовательно, оба метода Феррариса не позволяли получить кругового поля. И в том и в другом случае поле было эллиптическим.

Далее Феррарис переходит к описанию своих экспериментов, которые согласно его утверждению он проводил еще осенью 1885 г. Следует отметить, что факт открытия Феррарисом явления вращающегося магнитного поля в 1885 г. подтверждался и некоторыми его современниками. Так, М. Дери, выступая в 1891 г. на Международном электротехническом конгрессе во Франкфурте-на-Майне, заявил, что в 1885 или 1886 г. он посетил в Турине проф. Феррариса и последний демонстрировал ему некоторые элементы того, что было описано в докладе в марте 1888 г. [Л. 90].

Первый опыт Феррариса схематически иллюстрируется рис. 2-5. Здесь $1AAA1'$ — катушка из нескольких витков проволоки большого сечения, а $2BBB2'$ — катушка из большого числа витков тонкой проволоки. Плоскости катушек взаимно-перпендикулярны. Первая катушка включалась в первичную цепь трансформатора, а вторая — во вторичную. Подвешенный на нити полый медный цилиндр C приходит во вращение вокруг оси OO' , как только будут включены обе цепи токов. Если концы одной из катушек поменять местами, то на-

правление вращения цилиндра изменится на противоположное. В описанном эксперименте Феррарис показал возможность получения и использования вращающегося магнитного поля. Он нашел, что подобное устройство может служить не только для демонстрации новой модификации известного опыта Араго, но и для фиксирования разности фаз первичного и вторичного токов трансформатора или разности фаз между двумя любыми переменными токами одинаковой частоты. Для этого было бы удобно укрепить медный цилиндр на бифилярном подвесе и снабдить его зеркальцем для отброса луча на шкалу. Другими словами, Феррарис высказал идею создания фазометра.

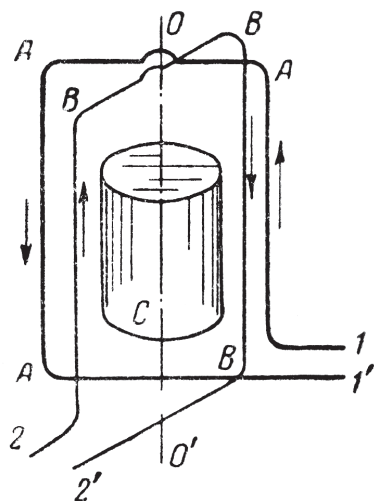


Рис. 2—5. Схема первого опыта Феррариса.

Феррарис пробовал заменить медный цилиндр стальным, однако при этом работа модели ухудшалась.

Затем Феррарис описал конструкцию небольшой экспериментальной модели индукционного двигателя с непрерывным вращением вала. Характерно замечание, которым он предваряет описание двигателя: «Сразу же очевидно, и это является также результатом

соображений, к которым я подойду позже, что сконструированный таким образом двигатель не имеет никакого значения как средство превращения электрической энергии, но при его простоте и при его свойствах он может быть использован для некоторых полезных применений» [Л. 89].

Что же представляла собой опытная модель двигателя Феррариса? На рис. 2-6 представлен поперечный разрез этого двигателя. AA' — две последовательно соединенные катушки, состоящие каждая из 96 витков проволоки диаметром 1,92 мм. Эти катушки включаются в первичную цепь трансформатора. BB' — две параллельно соединенные катушки, состоящие каждая из 504 витков проволоки диаметром 0,97 мм и включенные во вторичную цепь трансформатора последовательно с добавочным сопротивлением 15–20 ом. Медный цилиндр имеет внешний диаметр 89 мм и длину 180 мм. O — вал диаметром 10 мм. Частота тока составляла около 40 гц. Ротор начинал вращаться при токе в первичной цепи 5а и плавно набирал скорость вплоть до 900 об/мин. При этой скорости возникали сильные вибрации, вызывавшиеся, по мнению Феррариса, тем, что

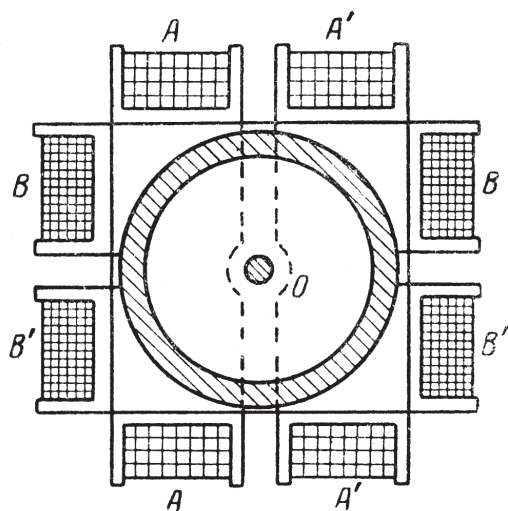


Рис. 2—6. Модель двигателя Феррариса (поперечный разрез).

ротор был плохо центрирован. При различной скорости вращения Феррарис при помощи небольшого динамометрического тормоза измерял мощность на валу двигателя. Максимальная мощность, которую развивал двигатель при скорости около 650 об/мин, составляла около 3 Вт.

Теперь нам осталось выяснить причину, заставившую Феррариса сделать слишком недальновидный вывод о том, что индукционный двигатель не может иметь никакого практического значения. Этот вывод явился результатом математического анализа, основанного на ошибочном начальном условии. Ход рассуждений Феррариса очень прост. Пользуясь для удобства современной терминологией и обозначениями, мы можем представить эти рассуждения следующим образом.

Если M — вращающей момент, ω_1 — скорость вращения поля, а ω_2 — скорость ротора, то мощность на валу (без учета механических и добавочных потерь):

$$P_2 = M\omega_2. \quad (1)$$

Полагая, что в машине существуют только потери на нагрев ротора (цилиндра), т. е. только потери в меди P_m , получаем:

$$P_m = P_1 - P_2 = M(\omega_1 - \omega_2), \quad (2)$$

где P_1 , — подведенная к машине мощность.

Разделим (1) на (2):

$$\frac{P_2}{P_m} = \frac{\omega_2}{\omega_1 - \omega_2}, \text{ или } \frac{P_2}{P_m + P_2} = \frac{P_2}{P_1} = \eta = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (3)$$

В каждом элементе ротора индуцируются токи, пропорциональные скорости вращения ротора относительно поля статора. Вводя коэффициент пропорциональности k и помня, что потери в меди пропорциональны квадрату тока, получим:

$$P_m = k(\omega_1 - \omega_2)^2,$$

а с учетом (2):

$$M = k(\omega_1 - \omega_2),$$

откуда

$$P_2 = M\omega_2 = k(\omega_1 - \omega_2)\omega_2.$$

Далее ФЕРРАРИС допускает ошибку, полагая, что двигатель должен работать при максимальной полезной мощности, а не при максимальном к. п. д. Он находит условия, при которых мощность на валу двигателя максимальна. Если скорость вращения поля ω_1 постоянна, то мощность P_2 максимальна, когда

$$\frac{dP_2}{d\omega_2} = 0$$

т. е.

$$k\omega_1 - 2k\omega_2 = 0.$$

Таким образом, мощность на валу максимальна, когда

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{2},$$

но при этом из (3) следует, что к. п. д. машины

$$\eta = \frac{\omega_2}{\omega_1} = 0,5.$$

Следовательно, перенеся в теорию электрических машин широко используемое в технике слабых токов правило, которое требует работы всех установок при максимальной мощности (правило, согласно которому при питании различных устройств от батареи гальванических элементов требуется равенство внешнего и внутреннего сопротивлений), Феррарис и пришел к ошибочному выводу:

«Эти вычисления, — говорит он, — и экспериментальные результаты подтверждают очевидное *a priori* заключение, что аппарат, основанный на этом принципе, не может иметь какого-либо практического значения как двигатель...» [Л. 89]. Действительно, двигатель, к. п. д. которого теоретически не может превышать 50 %, а практически, следовательно, и того меньше, едва ли мог кого-либо заинтересовать. Так ошибочное начальное условие в теоретическом анализе на некоторое время задержало развитие прогрессивной по своему существу технической идеи.

Сконструированный им прибор Феррарис предназначил только для учебных целей и электрических измерений.

Вывод Феррариса явился причиной того, что все, даже крупнейшие, электротехнические журналы либо не заметили вообще его работы (например, «Электричество»), либо ограничились краткой заметкой реферативного характера (например, «ETZ» [Л. 91]). В журнале «The Electrician» полный текст статьи Феррариса был опубликован лишь в 1895 г. [Л. 89]. Только после того, как стали известны работы Тесла и Доливо-Добровольского, вспомнили о Феррарисе, а после блестящих результатов демонстрации трехфазной системы в 1891 г. во Франкфурте-на-Майне он был награжден прусским орденом [Л. 92].

Итак, заслугой Феррариса является то, что он первым в наиболее ясной и строгой научной форме изложил существо явления вращающегося магнитного поля и методы его получения. Однако в работе ученого была допущена весьма поучительная ошибка, которую должен был исправить опыт практического изготовления машин. Мы увидим ниже, что опытных данных, которыми располагал к этому времени М.О.Доливо-Добровольский, оказалось достаточно для того, чтобы вскрыть ошибку Феррариса и смело и уверенно приступить к разработке конструкции многофазных индукционных двигателей. Это не умалило, однако, чувства глубокой благодарности, которое всегда испытывал М.О.Доливо-Добровольский к итальянскому ученому за сделанное им важное научное открытие. Это чувство он выразил Феррарису лично при первой же представившейся возможности.

Идеи создания двигателей с искусственной фазой разрабатывались одновременно с Феррарисом и вслед за ним некоторыми другими учеными и инженерами. Так, метод получения при помощи трансформатора двух токов с определенной разностью фаз был найден инженером фирмы Вестингауз Шалленбергером [Л. 93]. Он даже оспаривал у Феррариса приоритет в конструировании индукционного измерительного прибора, поскольку выданный Шалленбергеру 14 августа 1888 г. американский патент № 388003 был заявлен ранее сообщения Феррариса в Туринской Академии наук. В счетчике Шалленбергера (рис. 2-7) магнитный поток, создававшийся одной катушкой, индуктировал ток во второй катушке, расположенной внутри первой. Внутри же второй катушки располагался металлический диск, связанный со счетным механизмом.

Индуктированная во второй катушке э. д. с. отстает по фазе на 90° от потока первой катушки. Кроме того, благодаря самоиндукции вторичный ток еще отстает на определенный угол от индуктированной э. д. с. Следовательно, разность фаз токов обеих катушек находится в пределах $90 < \phi < 180^\circ$. Очевидно, полагая, что в среднем

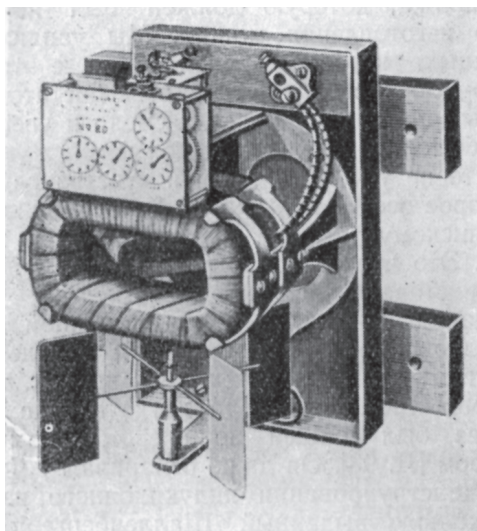


Рис. 2—7. Счетчик Шалленбергера.

эта разность составляет примерно 135° , Шалленбергер разместил оси катушек под углом 45° , чтобы получить вращающееся поле, по возможности более близкое к круговому.

На аналогичном же принципе был построен и счетчик Бореля, известия о котором появились в 1888 г.

Иной способ получения сдвига фаз, близкого к 90° , предложили французские электрики Ютен и Леблан. В 1890 г. они сконструировали электродвигатель, в котором статор представлял собой кольцо с двухфазной обмоткой [Л. 94 и 95]. Обмотка ротора была также двухфазной, а на валу ротора имелись кольца, благодаря которым в обе фазы включались реостаты. Фазный сдвиг у токов статора осуществлялся при помощи конденсатора. Это был, таким образом, первый конденсаторный двигатель. Авторы широко пропагандировали свое изобретение (например, на Франкфуртском конгрессе, где неоднократно выступал от их имени Корда [Л. 90] и подчеркивал преимущества нового двигателя), однако в то время при низком уровне конденсаторостроения и при отсутствии особой потребности в таком двигателе последний не нашел заметного распространения. В настоящее время конденсаторные двигатели глубоко изучаются учеными и находят все более широкое применение.

Выше мы вскользь заметили, что на двигатели с искусственной фазой некоторое время возлагали очень большие надежды и предполагали, что именно такие двигатели станут основой промышленного электропривода. Распространению такого убеждения способствовало то обстоятельство, что авторы конструкций двигателей настойчиво подчеркивали их главное достоинство: возможность питания от однофазных сетей. Эта перспектива представлялась тем более заманчивой, что к концу 80-х годов были построены уже многие станции и сети однофазного переменного тока. Их владельцы не имели ни малейшего желания сокращать масштабы своего производства и лишаться доходов в случае, если бы было найдено более экономичное решение проблемы электроснабжения.

Борьбу сторонников однофазного и трехфазного токов можно весьма наглядно показать на примере взаимоотношений М.О.Доливо-

Добровольского и известного швейцарского инженера Чарльза Броуна. Броун признавал, что до 1890 г. он не занимался многофазной системой [Л. 96]. Летом 1890 г. фирма АЭГ пригласила президента швейцарской фирмы «Эрликон» Губера и Броуна осмотреть сконструированный Доливо-Добровольским трехфазный асинхронный электродвигатель. Убедившись в ценности изобретения, руководители фирмы «Эрликон» немедленно заключили договор о лицензии с АЭГ, имея в виду дальнейшие совместные работы в этой области. Между Доливо-Добровольским и Броуном завязалась оживленная переписка, в которой они делились своими мыслями по конструктивному усовершенствованию изобретенных машин.

Приближалась Франкфуртская выставка, и обе фирмы взялись за деятельную подготовку к ней. Броун был действительно талантливым конструктором; он создал интересную конструкцию генератора для Лауфенской станции; еще ранее, около 1885 г., он предложил закрытую форму пазов для машин, которую, между прочим, одно время использовал для некоторых машин Доливо-Добровольский. На Франкфуртской выставке в 1891 г. Броун демонстрировал вызывавший всеобщее восхищение асинхронный трехфазный двигатель на 20 квт.

Однако в развитии техники трехфазного тока роль Броуна была весьма противоречива. В 1891 г. он вышел из фирмы «Эрликон», основал свою фирму «Броун-Бовери» и... резко изменил свое отношение к трехфазному току. Уже в ноябрьском номере журнала «Prometheus» за 1891 г. [Л. 97] Броун всячески дискредитирует Доливо-Добровольского как изобретателя системы трехфазного тока, извращает и принижает задачи и значение Лауфен-Франкфуртской передачи. Он утверждает, что цель этой передачи заключалась лишь в том, чтобы продемонстрировать возможность передавать энергию при очень высоком (по тому времени) напряжении, а трехфазная система лишь усложнила установку. За трехфазным током он признает единственное преимущество — возможность использования бесколлекторного индукционного двигателя. «Но коль скоро тем же током должно быть питаемо также и освещение, — пишет он, — то установ-

ка, принимая во внимание особенно сеть проводов, слишком сложна и во всяком случае было бы мало обоснованным рассматривать систему трехфазного тока как систему, которой принадлежит будущее». Время — лучший и самый строгий судья: оно показало, насколько ошибочным было это заключение Броуна.

Но мало того, Броун попытался лишить многофазную систему и «единственного» ее преимущества, объявив в 1893 г., что он сконструировал асинхронный бесколлекторный двигатель для обычного переменного тока (т. е. однофазного). Что же это была за «система Броуна», как он ее сам называл?

Статор двигателя Броуна был выполнен в виде кольца Грамма с закрытыми пазами, ротор — в виде беличьей клетки Доливо-Добровольского. Броун справедливо заметил, что, будучи подключен к сети однофазного тока, такой двигатель не возьмет с места. Как же он решает проблему пуска? Оказывается при помощи искусственной фазы. Например, он размещает на статоре дополнительную барабанную обмотку, смещенную пространственно по отношению к кольцевой обмотке Грамма и обладающую иной индуктивностью. Естественно, возникает вращающееся поле, и двигатель разбегаются.

Кроме этого, Броун получал фазный сдвиг, включая в дополнительную обмотку индуктивность, емкость или сопротивление. Но все эти методы уже были известны (Феррарис, Ютен и Леблан, И. Томсон и др.). Доливо-Добровольский по этому поводу иронически заметил, что единственное отличие двигателя Броуна состоит в том, что короткое замыкание индуктивности, емкости или сопротивления после достижения ротором нормальной скорости «у Броуна следует от руки, тогда как И. Томсон исполнял это автоматически» [Л. 14].

Приписывая себе все наиболее важные усовершенствования в асинхронном двигателе, Броун вызвал Доливо-Добровольского на публичную полемику, в которой он, между прочим, в порыве увлечения своими «новыми» двигателями, сделал неосторожный вывод: — «Я того мнения, что эти новые двигатели вытеснят двигатели многофазного тока во всех случаях, где наряду с общим распределением света должны также работать еще и двигатели, в то

время как многофазные двигатели находят все еще (!) рациональное применение только лишь в сетях с силовой нагрузкой» [Л. 96].

Доливо-Добровольский в своем ответе Броуну осветил действительную историю первых работ по трехфазному току. Он также, проанализировав свойства двигателя Броуна, указал, что этот двигатель может рассматриваться только как временная мера в пока еще существующих двухпроводных (однофазных) сетях переменного тока [Л. 14]. Несмотря на это, Броун еще длительное время оставался противником трехфазного тока. Уже после того, как Франкфурт стал колыбелью трехфазного тока, Броун выстроил там электростанцию однофазного переменного тока.

Позднее тоже предлагались многочисленные конструкции двигателей с искусственной фазой (в том числе и Доливо-Добровольским), но они стали рассматриваться как специальные машины, предназначенные для особых исполнительных механизмов, для использования в схемах управления. Широкого применения в промышленном приводе такие двигатели получить не могли, так как они существенно проигрывают в отношении простоты и экономичности в сравнении с трехфазными. В двигателях с искусственной фазой трудно добиться того, чтобы поле было близко к круговому как в пусковом, так и в рабочем режимах. Если устройства для смещения фаз рассчитывались на номинальный режим работы, то при запуске или при изменении нагрузки поле резко искажалось. Как известно, всякое эллиптическое поле может быть представлено как два круговых — прямой и обратной последовательности, но наличие в машине обратно вращающегося поля ведет к ухудшению ее характеристик. Представлялись, кроме того, обременительными как сама необходимость снабжать каждый двигатель реостатами, конденсаторами или индукционными катушками, так и потери мощности в них.

Другой путь в развитии многофазных систем состоял в том, чтобы не добиваться необходимой разности фаз у потребителя, а построить генератор, дающий, так сказать, в готовом виде два тока разностью

фаз в 90° , а затем в 60 или 120° . Иначе говоря, вторым путем был путь конструирования многофазных генераторов.

Но так же, как когда-то Араго не ставил перед собой задач практического использования своего диска, так и первые многофазные генераторы были построены совершенно не для тех целей, для которых они стали применяться впоследствии.

Решая важнейшую проблему системы электрического освещения «дробление электрического света» (т. е. питание от одного генератора нескольких дуговых источников света), П.Н.Яблочков еще в 1876 г. предложил секционировать обмотку якоря широко применявшегося в то время генератора Грамма. Конструктивно это легко было выполнить, закрепив в неподвижной станине секционированное кольцо (якорь) и заставив вращаться полюса, возбуждаемые постоянным током. В результате такого изменения машины Грамма получился настоящий многофазный синхронный генератор. По мысли Яблочкова в цепь каждой секции включался источник света, т. е. от одного генератора питалось несколько дуговых ламп. Яблочков и Грамм понимали, что в секциях такой машины индуцируются э. д. с., отличающиеся друг от друга по фазе, и именно поэтому они всячески избегали соединять цепи, подключенные к соседним секциям якоря.

Известный в конце прошлого века английский проф. Сильванус Томпсон сообщает [Л. 98], что в 1883 г. в Паддингтоне работали двухфазные генераторы, построенные Гордоном, а в 1886 г. Винн предложил систему распределительных цепей, «по которым пропускались переменные токи так, что, хотя быстрота перемен и была одинакова во всех, но моменты, когда происходили перемены направления, были различны». Однако и Гордон и Винн в своих работах руководствовались лишь одним желанием: получить от генераторов в тех же габаритах большую мощность. Иначе говоря, они ставили перед собой задачу улучшить использование машины. Им и удавалось этого достичь при многофазном исполнении генераторов, так как известно, что чем на большее число фаз разделена обмотка машины, тем лучше ее

использование¹. В дальнейшем мы увидим, что и позднее разрабатывались конструкции многофазных генераторов, причем имелось в виду лишь улучшение использования машин. Цепи отдельных фаз работали изолированно одна от другой.

Знакомство с работами Грамма, Яблочкова и других изобретателей с очевидностью показывает, что уже в 70-х и начале 80-х годов прошлого века были изучены законы распределения токов в отдельных секциях обмоток якорей. Было выяснено, что в обмотке якоря генератора постоянного тока можно найти такие витки, в которых индуктируются э. д. с. со строго определенной разностью фаз. Следовательно, можно было найти и две такие точки обмотки, разность фаз между которыми составляет ровно 90° . Таким путем можно было подойти к обычным конструкциям одноякорных вращающихся преобразователей.

Одноякорные преобразователи начали появляться в середине 80-х годов, и трудно установить приоритет того или иного лица в их изобретении. С. Томпсон сообщает, что в Англии Вальмсле́й построил одноякорный преобразователь в 1885 г. [Л. 98]. На электротехнической выставке в Петербурге, открывшейся в декабре 1885 г., машины, которые могли давать постоянный и переменный токи, демонстрировали А. И. Полешко и Н. Г. Глухов [Л. 100].

Широкую известность получил одноякорный преобразователь (рис. 2-8), построенный в 1887 г. инженером германской фирмы «Гелиос» Кёрпером [Л. 101]. Автор предназначал свою машину для преобразования постоянного тока в переменный, имея в виду передачу энергии на большие расстояния. Из чертежа и патентного описания следует, что Кёрпер взял обычную машину постоянного тока с параллельным возбуждением и рядом с коллектором насадил на вал еще два изолированных друг от друга и от вала контактных кольца d, f со щетками g, h . Эти кольца он соединил с двумя

¹ Доливо-Добровольский, например, в одном из своих выступлений сообщал, что он перестроил машину постоянного тока, дававшую 11 квт, в трехфазную, и мощность последней повысилась до 30 квт [Л. 99].

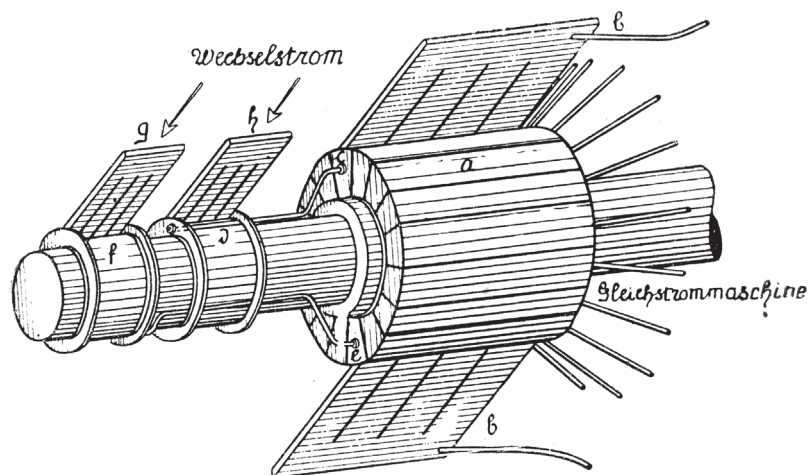


Рис. 2—8. Элементы конструкции одноякорного вращающегося преобразователя фирмы Гелиос.

противолежащими коллекторными пластинами с и е. При работе машины на щетках *g* и *h* получали переменный ток, следовательно, машина могла работать в качестве преобразователя одного рода тока в другой.

Теперь уже не представляло принципиальной трудности, взяв, кроме указанных двух пластин коллектора, еще две противолежащие пластины, но смещенные на 90° по коллектору (для двухполюсной машины), получить двухфазный ток. По-видимому, первым это сделал американский электротехник Чарльз Бредли.

В 1887 г. Бредли взял американский патент № 390439 на «динамо-электрическую машину» [Л. 102]. В патентном описании, опубликованном в октябре 1888 г., представлена машина постоянного тока, перестроенная в синхронную машину. На валу были расположены четыре кольца, соединенных с четырьмя равноотстоящими точками обмотки якоря (рис. 2-9). В описании сказано, что такая машина может служить генератором, двигателем, а если ее снабдить еще коллектором, то и одноякорным преобразователем. Но в патенте ни слова нет о свойствах вращающегося поля, да Бредли это,

собственно, и не интересовало. Единственным его стремлением было получить от этой машины большую мощность, т. е. улучшить использование машины. Как было указано выше, именно это стремление руководило работами и некоторых предшественников Бредли. В отличие от них Бредли использовал одну общую обмотку якоря и получал двухфазные токи, тогда как раньше использовались для этой цели две отдельные обмотки.

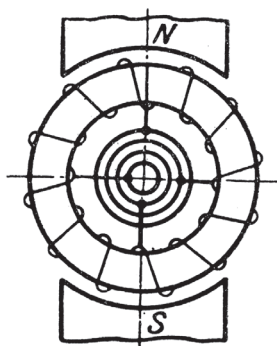


Рис. 2—9. *Схема соединений одноякорного преобразователя Бредли.
(получение двухфазного тока).*

В своих дальнейших работах Бредли был очень близок к тому, чтобы технически разработать все основные элементы многофазной системы: генераторы, многофазные линии, двигатели. Он нашел некоторые интересные решения, однако они частично были уже даны к этому времени в работах Тесла, частично совпадали по времени с более совершенными решениями Доливо-Добровольского.

Так, в американском патенте № 404465, заявленном 5 октября 1888 г., Бредли описал двухфазный асинхронный двигатель [Л. 103]. Однако к этому времени такой двигатель был уже описан Тесла.

В патенте № 409450, заявленном 20 октября 1888 г. и опубликованном в августе 1889 г., Бредли описал способ получения трехфазных токов [Л. 104]. Его способ состоял в том, что он делал отводы от трех равноотстоящих точек обмотки якоря машины постоянного

тока (рис. 2-10). Это опять-таки был синхронный генератор или, если сохранялся коллектор, одноякорный преобразователь, но так же как и двухфазный генератор, совершенно не предназначался для питания многофазных двигателей. В этом легко убедиться, если взглянуть на рис. 2-11, который мы заимствуем из рассматриваемого патента. От трех колец идут три провода, к которым подключается нагрузка. Как видно из схемы, нагрузка включалась между двумя проводами, т. е. на одну фазу, и Бредли заботился лишь о том, чтобы отдельные фазы были нагружены равномерно. Он по-прежнему ограничивался решением задачи об улучшении использования машины. В этом патенте нет ни слова о вращающемся поле.

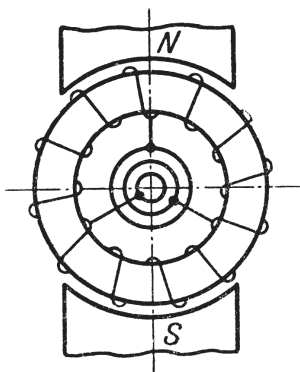


Рис. 2—10. *Схема соединений одноякорного преобразователя Бредли (получение трехфазного тока).*

Бредли сделал крупный шаг в истории многофазной системы: он открыл *связанную* трехфазную систему¹, но к своему несчастью не осознал важности открытия. Более того, в патентном описании

¹ Напомним, что *трехфазная цепь*, в которой каждая фаза генератора независимо от других соединена двумя проводами со своим приемником, называется *несвязанной трехфазной цепью*. Если вместо трех отдельных обратных проводов применить один общий провод, то получается *четырёхпроводная связанная трехфазная цепь*. Если устранить общий обратный провод, то получается *трехпроводная связанная трехфазная цепь*.

как бы в подтверждение того, что автор не оценил всех сторон своего изобретения, подчеркивается, что здесь получаются «три отдельных тока» и – в другом месте – «три независимых (?) серии переменных токов».

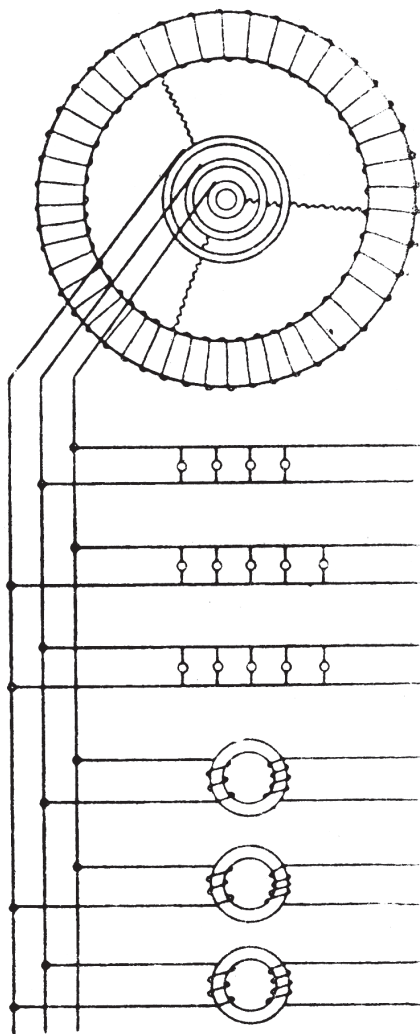


Рис. 2—11. *Схема распределения трехфазных токов по Бредли.*

Познакомившись с работами Бредли, мы можем сделать вывод, что, хотя он по техническому содержанию своих работ и был очень близок к разработке трехфазной системы как новой комплексной области электротехники, тем не менее по ходу своих мыслей и по достигнутым результатам был к ней не ближе, чем Депре к открытию вращающегося магнитного поля. Заметим, что сам Бредли не публиковал никаких своих статей, не претендовал на приоритет и нет даже сведений, выполнил ли он практически свои машины. Есть лишь единственное сообщение о его докладе «Передача энергии на далекие расстояния», сделанном в 1893 г. Казалось бы, что в докладе на такую тему он непременно должен был сказать о своих работах. Но он говорил в основном лишь о передаче постоянным током, а о переменном токе сказал следующее: «Многофазная система переменного тока стала известна главным образом благодаря Лауфен-Франкфуртской установке для передачи энергии... и мы обязаны глубокой благодарностью людям, неутомимому усердию которых приписывается ее осуществление» [Л. 105]. Следует отдать должное скромности и добросовестности Бредли, признавшему, по существу, что его работы были еще далеки от практической завершенности и не сыграли решающей роли в развитии электротехники.

Для будущего мы здесь заметим, что Бредли одним из первых разработал принципиальную схему трехфазного синхронного генератора и трехфазного одноякорного преобразователя.

В одно время с Бредли, но по другую сторону океана, работал немецкий инженер Фридрих Аугуст Хазельвандер. Его изобретение тоже могло бы открыть целую эпоху в развитии электротехники, если бы Хазельвандер сумел придать ему практический характер и убедительно показать перспективы его развития. Но, к сожалению, для Хазельвандера, он так же, как и Бредли, не сумел в достаточной степени оценить важности своего изобретения и своевременно не увидел всех заключенных в нем возможностей. Кроме того, условия, в которых начинал свои работы Хазельвандер, оставляли желать много лучшего.

Изучение истории науки и техники показывает, какими сложными и запутанными путями пробиваются те или иные открытия и изобретения. Как часто открытие оставалось непонятым и забытым, если оно появилось слишком рано, когда не было в нем еще насущной потребности, когда научно-технические предпосылки его еще не созрели! Такая же судьба постигла и те открытия и изобретения, которым авторы не умели придать практического характера и необходимого размаха.

История техники убедительно показывает, что изобретатель должен проявить большую настойчивость, смелость и эрудицию для того, чтобы доказать жизнеспособность своего изобретения. Иначе современники его не заметят, и в лучшем случае вспомнят о нем лишь тогда, когда другие сумеют придать уже повторенному изобретению практические формы и промышленный масштаб. Впрочем, это вполне закономерное явление, ибо, по существу, почти не бывает, что какое-либо крупное изобретение сделано одним человеком или даже в одной стране. Напротив, широко известно, что, начиная с паровой машины, все крупнейшие изобретения носят, как правило, интернациональный характер и являются в определенном смысле результатом коллективного творчества. С этой точки зрения также вполне закономерными и даже типичными были пути развития многофазных систем. Ученые и инженеры разных стран работали над своими открытиями и изобретениями, решали частичные проблемы, подготавливая тем самым почву для крупных обобщений и широкого практического применения их идей.

Вернемся, однако, к Хазельвандеру. Он начал свои опыты еще в июле – августе 1887 г. и в октябре того же года построил многофазные синхронные машины: генераторы и двигатели. Один такой генератор работал с осени 1887 г. до 1889 г. на фабрике в Оффенбурге и питал осветительную сеть. Его эксплуатация была прекращена лишь в связи с протестом телеграфной компании, заявившей, что сеть переменного тока оказывает заметное влияние на работу линий связи [Л. 106]. Однако работами Хазельвандера руководило отнюдь не понимание и знание свойств вращающегося магнитного

поля, которое может быть получено при помощи многофазных токов. Он хорошо знал те трудности, которыми сопровождалась попытка решить проблему электропередачи. Он знал, что нужно сделать так, чтобы по линии передавался переменный ток, который можно трансформировать. Но, с другой стороны, следовало позаботиться о том, чтобы в конце линии можно было включить двигатели, а не ограничивать круг потребителей источниками света и нагревательными приборами.

Как же решает эту проблему Хазельвандер? Ход его мыслей был следующий [Л. 107]. В обмотке якоря машины постоянного тока генерируется переменный ток, который преобразуется коллектором в ток постоянного направления. Будучи передан по линии, этот ток у электродвигателя снова при помощи коллектора превращается в переменный ток в обмотке якоря. Возникает вопрос: всегда ли необходимы такие взаимообратные преобразования тока, нельзя ли устранить взаимно-противоположные функции коллектора у генератора и двигателя? Оказывается можно. Для этого достаточно те проводники, которые соединяют секции обмотки якоря с пластинами коллектора и в которых течет переменный ток, превратить в линию передачи, т. е. от генератора должно отходить при этом столько проводов, сколько имелось коллекторных пластин. Но это сделало бы многопроводную линию слишком дорогой. Оказалось, что число этих проводников можно уменьшить. Практически можно поступить следующим образом: взять несколько равноотстоящих обмоток якоря генератора и соединить их с соответствующими точками обмотки якоря двигателя. Задача упрощается, если использовать обращенные машины, т. е. машины, у которых якорь неподвижен, а вращаются полюса с обмоткой возбуждения.

Рассудив подобным образом, Хазельвандер осуществил свою идею. Стремление сделать установку более экономичной заставляло его уменьшать число линейных проводов. Хазельвандер уменьшил число точек обмотки якоря, от которых делались отводы, до четырех и получил двухфазные синхронные машины, связанные четырьмя проводами. Затем он попробовал пойти дальше и установил, что

минимально возможное число проводов – три. Таким образом, он пришел к трехфазной системе.

Хазельвандер считал, что и при трех проводах предложенная им система остается слишком сложной и дорогой. Это еще один пример того, как правильное решение иногда не находит своего развития! Только 30 июня 1889 г. Хазельвандер решил подать патентную заявку. Не исключена возможность, что он принял это решение под влиянием работ Феррариса и Тесла. То, что эти работы были ему известны, подтверждается текстом самого патента Хазельвандера, где он ссылается на работы Тесла. А может быть к этому времени просочились первые сведения о том, что на заводах АЭГ успешные опыты с многофазными токами уже проводил Доливо-Добровольский.

Патент № 55978 был выдан Хазельвандеру 24 апреля 1891 г., т. е. тогда, когда уже изготовлялось оборудование для линии передачи трехфазным током Лауфен – Франкфурт.

Рассмотрим подробнее патент Хазельвандера [Л. 108]. Вначале автор описывает соединение генератора и двигателя посредством четырех проводов. Заметим, что Хазельвандер нигде не говорит о вращающемся магнитном поле и имеет дело только с синхронными двигателями. На рис. 2-12 представлена схема, приведенная в патентном описании. Здесь Г – генератор, Д – двигатель. Обмотки возбуждения обеих машин питаются от отдельных генераторов постоянного тока.

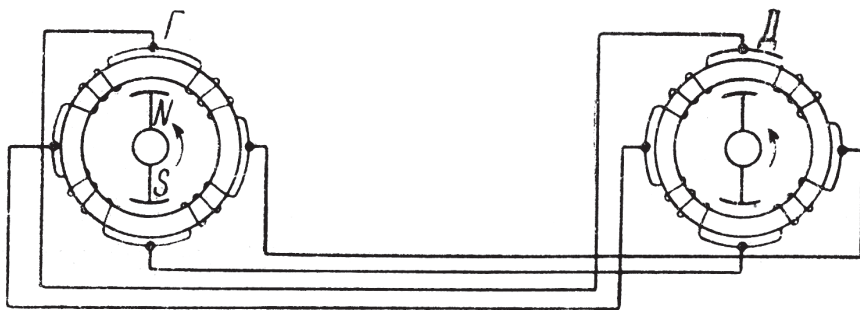


Рис. 2–12. *Схема двухфазной цепи Хазельвандера.*

Дальше Хазельвандер показывает возможность преобразования многофазного тока в постоянный с тем, чтобы иметь возможность включать в сеть двигатели постоянного тока. Это преобразование (рис. 2-13) он осуществлял при помощи механического преобразователя K , приводимого во вращение с синхронной скоростью от отдельного синхронного двигателя. Понятно, что этот преобразователь представлял собой не что иное, как коллектор, перенесенный к месту потребления. Если коммутатор K вращался синхронно с валом генератора G , то на щетках $B - B$ получался постоянный ток. Трудно сказать, было ли такое решение более экономичным, чем применение двигатель-генераторного преобразователя, поскольку, как мы отметили, коммутатор приводился во вращение синхронным двигателем, питавшимся по той же линии.

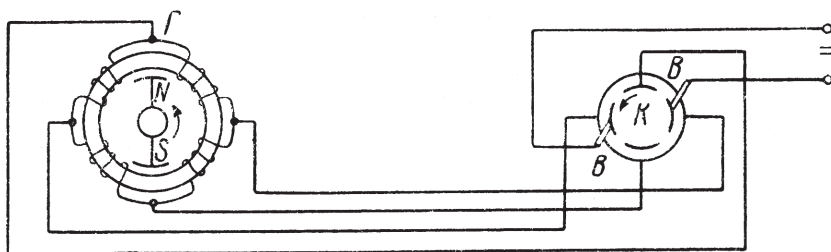


Рис. 2—13. Механический преобразователь Хазельвандера.

Такое же решение проблемы электропередачи, предусматривающее применение синхронно вращающихся коммутаторов, предлагалось в конце 80-х годов и фирмой Шуккерта [Л. 109]. Она даже обратилась в феврале 1890 г. в патентное ведомство с просьбой о выдаче патента, но оказалось, что изобретение уже было сделано Хазельвандером. Применение механического преобразователя свидетельствует о том, что Хазельвандер не придавал самостоятельного значения многофазной системе вообще и многофазному двигателю в частности.

На рис. 2-14 представлена схема трехфазной цепи Хазельвандера. Слева мы видим синхронный генератор, схема которого была

заимствована Хазельвандером у И. Томсона, построившего для дуговых ламп генератор постоянного тока с тремя коллекторными пластинами; ХАЗЕЛЬВАНДЕРУ оставалось лишь убрать в генераторе Томсона коллектор¹. Справа – синхронный двигатель. В линию включена группа из трех трансформаторов, обмотки которых соединены в звезду. В другой схеме Хазельвандер показывает возможность в случае трехфазной системы так же, как и ранее, применять двигатели постоянного тока, если использовать синхронно вращающийся коммутатор с тремя пластинами.

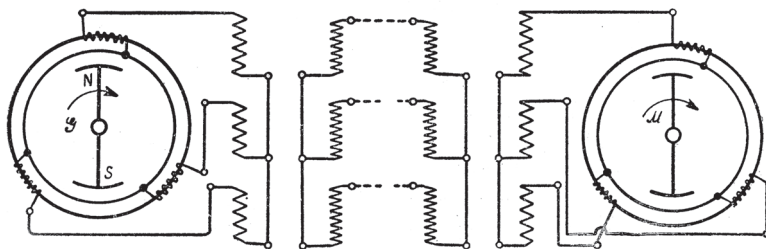


Рис. 2–14. *Схема трехфазной цепи Хазельвандера.*

Во второй части патента Хазельвандер решает сложную, но сомнительную в отношении практической ценности проблему: если перед электродвигателями включаются последовательно в каждую фазу еще какие-либо потребители, то для удобства регулирования тока в каждой фазе предлагается заменить один генератор четырьмя отдельными синхронными машинами, токи которых отличаются по фазе на определенную часть периода.

Как мы уже отмечали, Хазельвандер длительное время не придавал большого практического значения разработанной им системе. К тому же, он не видел возможности придать делу широкий размах,

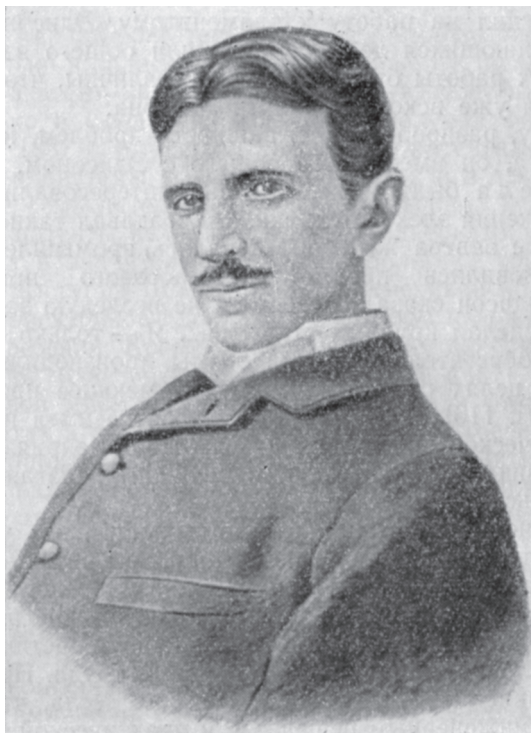
¹ ХАЗЕЛЬВАНДЕР, собственно, и начал свои работы в области многофазных токов с ремонта генератора фирмы И. Томсона. Специфическая конструкция этого генератора натолкнула его на мысль заменить коллектор контактными кольцами.

пока он оставался владельцем небольшой фирмы, скорее мастерской, в Оффенбурге. Он пытался заинтересовать своим изобретением некоторые крупные фирмы, но лишь фирма «Ламейер и К°» обратила на него внимание. Эта фирма стала действовать особенно энергично в связи с тем, что стали известны уже труды Феррариса и Тесла, а затем Доливо-Добровольского. Хазельвандер продал свой патент фирме «Ламейер и К°», поступил сам на службу к этой фирме, и обстоятельства сложились таким образом, что он стал фактически тормозить развитие многофазных систем. В Электротехническом обществе был возбужден надолго затянувшийся спор о приоритете, а фирма выступила против... сооружения электропередачи Лауфен — Франкфурт. Мотивировано было это выступление тем, что никто, якобы, не имеет права заниматься работами по многофазному току, кроме фирмы «Ламейер и К°», поскольку она владеет патентом Хазельвандера.

Это уже переходило все границы, и сооружавшая Лауфен — Франкфуртскую линию компания АЭГ, владевшая патентами Доливо-Добровольского, вынуждена была обратиться за защитой в патентное ведомство. Разобрав дело и убедившись, что система генерирования многофазных токов уже известна из патентов Бредли и Тесла (1888 г.), патентное ведомство опубликовало 12 мая 1892 г. извещение следующего содержания:

«Имеющим законную силу решением Патентного ведомства от 12 ноября 1891 г. требование 1 патента № 55978, принадлежащего фирме «В. Ламейер и К°» во Франкфурте на М., касательно системы передачи на большое расстояние для переменных токов, объявляется недействительным» [Л. 109].

В патенте было оставлено в силе лишь требование 2, закреплявшее за фирмой «Ламейер и К°» право исключительного использования системы с числом генераторов, равным числу проводов линии передачи. Апелляция, поданная в государственный суд, была отклонена. Спор между Хазельвандером и фирмой АЭГ был настолько обостренным, что он фигурировал даже в качестве примера при обсуждении проекта нового германского права [Л. 110].



Никола Тесла (1856–1943).

Хазельвандер был сам не рад тому, что он оказался втянутым в этот неприятный для обеих сторон спор. В связи с этим он потерял интерес к электротехнике и целиком переключился на разработку проблем конструирования нефтяных двигателей [Л. 106 и 111]. Так сложилась судьба одного из участников крупнейшего международного изобретения — системы многофазных токов.

Выше мы неоднократно упоминали о работах Нико́лы Тесла. Исследователи трудов Тесла (Мартин, Бокшан) утверждают, что мысль о возможности построения бесколлекторного индукционного электродвигателя возникла у него еще в 1882 г. [Л. 112–115]. Но в течение нескольких лет условия работы Тесла не позволяли ему серьезно заняться весьма интересовавшей его проблемой. Служба в Будапешт-

ской телефонной компании, а затем на предприятиях Парижской электротехнической фирмы не давала молодому инженеру ни времени, ни средств для глубокой и всесторонней экспериментальной проверки своих идей. Поэтому в 1884 г. он принял решение последовать совету знакомых американцев, которые рекомендовали ему отправиться в Соединенные Штаты, где, по их словам, можно быстро реализовать любое изобретение. В Америке Тесла поступил на работу к знаменитому Эдисону. Однако эти два выдающихся деятеля не нашли общего языка; стиль и методы их работы были настолько различны, что Тесла вынужден был уже вскоре покинуть Эдисона.

По числу, разнообразию и важности проблем, которые решал Тесла, он имел много общего с Эдисоном, но методы и цели Тесла были иные. Эдисона интересовали практические приложения электротехники. Он создавал такие конструкции, которые завтра же использовались промышленностью, в быту, становились предметами массового производства. Однажды Эдисон оказал о себе: «Я не исследую законов природы и не сделал крупных открытий... Я — только профессиональный изобретатель. Все мои опыты производились исключительно в целях отыскать что-либо, имеющее практическую ценность» [Л. 116]. Известно, что Эдисон не имел почти никакой теоретической подготовки и испытывал неприязнь к математике, физике и другим наукам, целиком полагаясь на свое изобретательское чутье.

В отличие от Эдисона Тесла был настоящим ученым, до некоторой степени даже больше ученым, чем инженером. Тесла разрабатывал основные идеи и принципы, предоставляя другим изобретателям и инженерам их практическое применение. Тесла говорил об Эдисоне, что небольшие теоретические знания и вычисления сэкономили бы ему 30 % труда. Но с неменьшим основанием можно сказать о самом Тесла, что большее внимание к инженерным решениям, к практической разработке конструкций позволили бы ему стать основоположником важнейших отраслей современной электротехники. Знакомство с трудами Тесла в области многофазных систем покажет нам, как, выдвинув вначале замечательные идеи, он

впоследствии остановился перед техническими трудностями и перешел к решению более мелких и менее перспективных проблем.

Расставшись с Эдисоном, Тесла в 1885 г. основал в Нью-Йорке «Tesla Arc Light Company», которая должна была использовать патенты Тесла на новые конструкции дуговых ламп, но опять-таки не дала ему возможностей целиком посвятить себя исследованию многофазных систем. Лишь в 1887 г. группа финансистов заинтересовалась идеями Тесла и помогла ему создать небольшую фирму «Tesla Electric Company» для реализации его открытий. В мастерских и лаборатории этой компании были построены первые многофазные машины Тесла. Однако Тесла недолго пользовался безграничными возможностями отдаваться своему любимому делу. Его теоретические изыскания не удовлетворяли финансистов-бизнесменов и Тесла вынужден был покинуть и эту фирму с тем, чтобы в 1888 г. поступить на службу в компанию Вестингауз. В собственность этой компании перешли и все американские патенты Тесла.

Тесла как изобретатель отличался необычайной плодовитостью. Только в области многофазных систем им был получен 41 патент, а всего он сделал около 800 изобретений и открытий и только в Соединенных Штатах получил 113 патентов. 12 октября 1887 г. он сделал первые две патентные заявки на многофазные системы, в ноябре — еще три и в декабре — две. Все первые семь патентов Тесла были выданы 1 мая 1888 г. Некоторые патенты являлись лишь дополнениями один к другому. Тесла в значительной степени облегчил труд будущих историков, выступив 16 мая 1888 г. в Американском институте инженеров-электриков с докладом, в котором изложил существо своих изобретений. Кроме того, он получил в Германии и Англии патенты (соответственно № 47885 и 6481), в которых обобщил свои многочисленные изобретения и открытия.

В патентах и докладе Тесла описал открытое им независимо от Феррариса явление вращающегося магнитного поля и принципиальные схемы многофазных машин. Таким образом, мы видим, что Тесла и Феррарис работали одновременно, но Тесла сделал патентные заявки уже в 1887 г., тогда как Феррарис опубликовал свои ра-

боты только в марте 1888 г. Правда, публичное выступление Тесла состоялось спустя два месяца после выступления Феррариса.

Тесла, как и Бредли, показал возможность построить многофазные одноякорные преобразователи. Однако вначале наибольшее внимание он уделял конструкциям синхронных многофазных генераторов и электродвигателей с электрически не связанными фазами.

Анализируя работу машин постоянного тока, Тесла, как и Хазель-вандер, пришел к выводу, что, во-первых, коллектор выполняет две взаимообратные функции и, во-вторых, при помощи коллектора в обмотке якоря электродвигателя производится постоянное пространственное смещение магнитного поля. Тесла ставит вопрос: как можно осуществить эту операцию при помощи непосредственного действия переменного тока? Он рассуждает так.

Если взять генератор, у которого возбуждение осуществляется постоянным током, а на роторе (якоре) имеются две независимые, расположенные под прямым углом друг к другу обмотки, то в этих обмотках индуцируются два независимых тока, сдвинутых по фазе на 90° . Эти токи можно вывести на четыре контактных кольца и направить к электродвигателю.

Взглянем на рис. 2-15, на котором представлены схемы из английского патента Тесла № 6481 (от 1 мая 1888 г.), обобщающего многие его предложения. На схеме и справа изображен генератор с двумя взаимно-перпендикулярными катушками и четырьмя кольцами на валу, слева — двигатель, статор которого выполнен в виде кольца, набранного из шайб листовой стали и несущего на себе четыре катушки, а ротор — в виде стальной пластины со срезами. Схематическими рисунками $a - z$ и $a' - z'$ Тесла иллюстрирует изменение положения результирующей двух потоков в зависимости от положения в магнитном поле двух обмоток генератора и показывает, что таким путем достигается непрерывное перемещение магнитного поля (термином «вращающееся магнитное поле» Тесла еще не пользуется). Обратим внимание, что описанная конструкция статора двигателя ничем не отличается от «уравнителя токов» Депре. Далее Тесла по-

казывает, что полученное постоянное перемещение (вращение) поля можно использовать самыми различными путями.

Так, на схемах *к*, *л*, *м* (рис. 2-15) показаны варианты исполнения синхронных двухфазных машин. На схеме *к* представлен генератор, на схеме *л* — двигатель, ротор которого имеет двухфазную обмотку и вращается между полюсами постоянного магнита; схема *м* иллюстрирует способ соединения генератора и двигателя. На схемах *н* и *о* показано трехфазное исполнение генератора и двигателя, причем здесь ясно видно, что Тесла предлагает несвязанную трехфазную систему с фазным сдвигом 60° , требующую шесть линейных проводов. Двигатель в этой схеме имеет выступающие полюса на статоре и ротор в виде стальной пластинки. Схемы *п* и *р* иллюстрируют еще один вариант синхронных машин. Здесь машины выполнены обращенными, и поэтому не имеют контактных колец (за исключением колец для подвода тока возбуждения). На схемах *с* и *т* изоб-

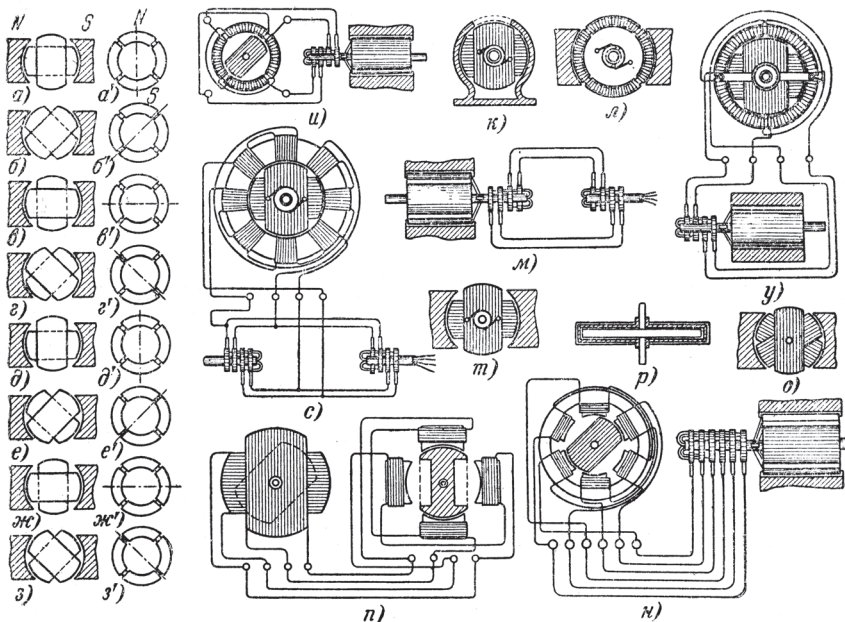


Рис. 2—15. Схема Тесла (английский патент № 6481).

ражены генератор и двигатель, причем последний имеет ту особенность, что ток у него подводится и к статору и к ротору. Соединения осуществлены таким образом, что поля ротора и статора вращаются в противоположных направлениях. Это было сделано с целью увеличить скорость машины.

Наконец, на схеме у изображен асинхронный двухфазный электродвигатель, у которого обмотка ротора выполнена в виде двух замкнутых на себя катушек, расположенных на гладком стальном цилиндре под прямым углом друг к другу.

В других своих патентах Тесла описал двухфазные трансформаторы, представлявшие собой замкнутые стальные кольца, на которых располагались так же, как на кольцевом статоре двухфазного двигателя, соответствующие первичные и вторичные катушки.

Согласно указаниям Ч. Штейнметца [Л. 117] и С. Бокшана [Л. 112] в американских патентах № 390413 и 390414 (апрель 1888 г.) Тесла описал трехфазную систему с синхронными машинами, обмотки которых были соединены в звезду¹. Таким образом, в этом он повторял изобретения Хазельвандера и при этом шел тем же самым путем, используя для своих целей упомянутую нами выше трехкатушечную машину И. Томсона. М. О. Доливо-Добровольский указывал, что применение трехфазной системы Тесла мыслил только для синхронных машин [Л. 37]. Так, Тесла нашел возможность построения связанной трехфазной цепи, но не развил ее в дальнейших своих работах.

Итак, что же сделал Тесла? Из приведенных патентов и упомянутого доклада Тесла следует, что в 1887–1888 гг. он самостоятельно открыл явление вращающегося магнитного поля, указал принципы построения многофазных синхронных генераторов и двигателей,

¹ Во Всесоюзной Патентной библиотеке указанных патентов нет, а в патентных формулах этих патентов, опубликованных в *Official Gazette*, Vol. 45, стр. 64–65 о связанной трехфазной системе ничего не говорится и на чертежах изображены двухфазные машины. То обстоятельство, что Тесла, упоминая, по-видимому, в тексте патента о связанной трехфазной системе, тем не менее не включил ее в патентную формулу, свидетельствует о недооценке с его стороны трехфазной системы.

а также асинхронных двигателей, и разработал схемы двухфазных трансформаторов. Следовательно, он сделал все необходимое для того, чтобы приступить к практическому использованию многофазных систем. Принципиальные основы были заложены и оставалось найти наилучшие конструктивные формы. Но вот здесь-то Тесла и встретился с наибольшими трудностями.

Действительно, посмотрим, что Тесла делал дальше. Он ошибочно считал наиболее целесообразной в техническом отношении и наиболее экономичной систему двухфазных токов. Но первым, что его смущало, была необходимость применения четырех проводов. Привычной схемой сети переменного тока являлась двухпроводная цепь. И вдруг требовалось число проводов удвоить. Тесла считал это невозможным. Стремясь уменьшить число проводов, он нашел, что при двухфазной системе можно сделать один провод общим (рис. 2-16), т. е. сократить число проводов до трех. Правда, экономия в проводниковом материале получалась незначительной, так как сечение обратного провода при двухфазной системе должно быть почти в 1,5 раза больше сечения каждого из двух других проводов. Это объясняется тем обстоятельством, что в двухфазной системе фазный угол равен 90° , и, следовательно, максимальное значение суммарного тока в $\sqrt{2}$ раз больше максимальных значений каждого из двух токов (рис. 2-17).

Но и трех проводов, по мнению Тесла, было слишком много. Поэтому он предложил такую схему: обе системы катушек в двухфазных генераторе и двигателе соединяются соответственно по-

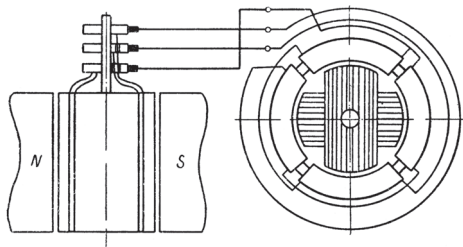


Рис. 2—16. Трехпроводная двухфазная цепь.

следовательно, и точки их соединения заземляются. В этом случае сохраняется двухпроводная линия передачи, а на время пуска в качестве общего обратного провода используется земля. Следовательно, двигатель запускается как двухфазный, а по достижении им нормальной скорости, заземление отключается и он продолжает работать как однофазный [Л. 118].

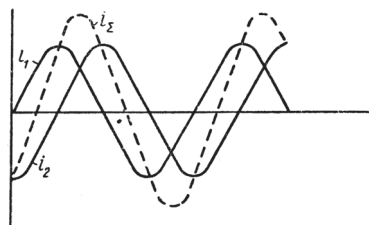


Рис. 2—17. Токи в двухфазной системе.

Целая серия следующих патентов Тесла содержит описание различных методов создания искусственной фазы при питании двигателей от двухпроводной сети переменного тока (комбинации реактивных и омических сопротивлений). Это свидетельствует о том, что Тесла, имея в виду практическое применение его системы, никак не мог преодолеть тот барьер, который, по его мнению, ставился увеличением стоимости сети в связи с применением числа проводов больше двух.

Изучение трудов Тесла в области многофазных систем вызывает смешанное чувство восхищения и некоторого сожаления. Этот выдающийся ученый, оставивший неизгладимый след в истории электротехники и радиотехники, особенно в области техники высоких частот и высоких напряжений, в своих работах, посвященных многофазным системам, шел, по сути дела, от лучшего к худшему, от блестящих решений принципиальных вопросов к неудачным практическим схемам и конструкциям. В этом отношении является показательным тот факт, что в одном из последних патентов рассматриваемой серии, в американском патенте № 459772, заявленном в 1891 г., Тесла предлагал на валу синхронного двигателя помещать

асинхронный разгонный двигатель с вспомогательной фазой. Таким образом, начав с задачи создать экономичный бесколлекторный двигатель переменного тока, Тесла, наперекор логике развития, прошел путь от двухфазных асинхронных машин к однофазным двигателям с вспомогательной фазой и, далее, к разгонным двигателям.

В практических работах по проектированию и изготовлению машин переменного тока Тесла пользовался помощью тогдашнего своего ассистента, впоследствии известного американского инженера и ученого Чарльза Скотта. Оба инженера не сумели найти удовлетворительных конструктивных решений. Наиболее типичной схемой установок «системы Тесла» являлась схема рис. 2-18. Здесь слева изображен уже известный нам двухфазный синхронный генератор, а справа — асинхронный двигатель. Ротор двигателя имел обмотку в виде двух взаимно-перпендикулярных короткозамкнутых катушек, причем сопротивление обмотки было значительным. Существенным недостатком построенных двигателей Тесла были выступающие полюса с сосредоточенной обмоткой, что явилось результатом механического переноса конструктивных форм машин постоянного тока в технику переменного тока. Эти двигатели имели очень большое магнитное рассеяние и крайне неблагоприятное распределение намагничивающей силы вдоль воздушного зазора.

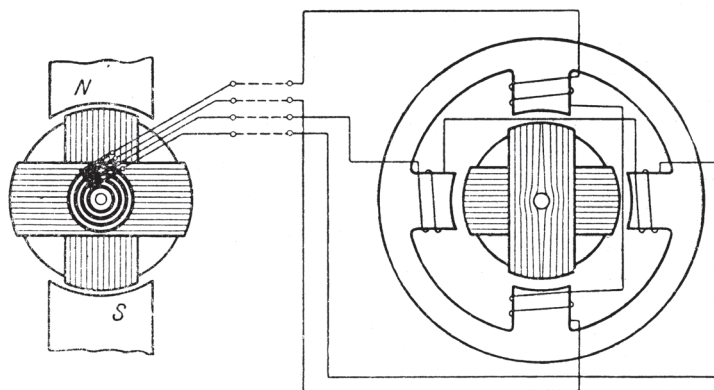


Рис. 2—18. Схемы генератора и двигателя Тесла.

Принимая во внимание эти особенности, легко понять причины того, почему двигатели Тесла имели плохие как пусковые, так и рабочие свойства.

Ч. Скотт отмечал позднее, что существенным затруднением в его работах, проводимых совместно с Тесла, являлось то, что в конце 80-х годов в Америке получили уже значительное распространение однофазные сети, питавшиеся током сравнительно высокой частоты — 133 гц [Л. 119]. Изобретателям приходилось доказывать целесообразность как перестройки самих сетей, так и снижения частоты.

Небезынтересно проследить дальнейшую судьбу двухфазной системы Тесла. Хороший материал для этого дает статья бывшего главного инженера фирмы Вестингауз Лэмма [Л. 120]. Он был одним из участников работ Тесла и уже в 1921 г. достаточно объективно описал работы компании Вестингауз по развитию двухфазной системы.

Лэмм отмечает, что Скотт, начав работать совместно с Тесла, впоследствии продолжал свои работы самостоятельно. Скотт разработал конструкцию зубчатого ротора для асинхронного двигателя с перекрывающейся распределенной, но все еще двухфазной обмоткой. Этим он несколько улучшил пусковые свойства двигателя, но выяснить влияние сопротивления обмотки ротора на вращающий момент ему не удалось. Все указанные выше трудности, а также вызванное кризисом финансовое напряжение в делах компании привели к тому, что в 1890 г. работы по многофазной системе были прекращены. До этого момента было выполнено в качестве пробы несколько небольших двухфазных двигателей для привода горнорудных машин вблизи Питтсбурга (где находились заводы компании).

В конце 1891 г. работы возобновились. В это время наиболее целесообразной уже считалась частота 60 гц. В 1892 г. Лэмм испытал первый двигатель компании Вестингауз с распределенной обмоткой на статоре, а испытания по «укорачиванию» обмотки ротора привели к короткозамкнутой обмотке в виде беличьей клетки. Но, с сожалением заключает Лэмм, и то и другое было уже раньше известно в Европе!

Первая крупная установка компании Вестингауз, предназначенная для двухфазного тока напряжением 2 200 в при частоте 60 гц, выполнена в 1892 г. и в следующем году экспонировалась на Чикагской всемирной выставке. Однако в соседнем зале представители фирмы имели возможность познакомиться с более совершенными образцами машин трехфазного тока, изготовленными германской фирмой АЭГ.

После 1892 г. компания Вестингауз приступила к строительству станций двухфазного тока, правда в ограниченных масштабах. Триумфом системы Тесла считалась грандиозная установка на Ниагарском водопаде. Этот знаменитый водопад издавна привлекал внимание инженеров и ученых, воображение которых рисовало фантастические проекты использования громадной энергии, заключенной в массах низвергавшейся воды. В середине прошлого века стали составляться проекты электрической передачи энергии Ниагарских водопадов. В 1882 г. журналы и газеты принесли сенсационное сообщение: известный изобретатель одной из систем электрического освещения Леонард Генкль учредил акционерное общество, которое за миллион долларов купило Ниагарский водопад. В сообщении указывалось, что «силой водопада он (Генкль — О.В.) заставит громадную машину производить электричество, которое при посредстве электрического кабеля будет освещать 63 американских города. Генкль... полагает, что полученным электричеством можно будет пользоваться на расстоянии 500 миль» [Л. 121].

Наконец, в 1889 г. была образована компания «Cataract Construction Co», которая приобрела право использования 450 000 л. с. и на реальной основе приступила к реализации идеи о строительстве Ниагарской гидроэлектростанции. Совещание крупных ученых и инженеров, собранное для обсуждения вариантов проектов будущей станции, согласилось с предложением английского проф. Форбса о применении двухфазного тока.

Воодушевленные успехами Лауфен-Франкфуртской электропередачи, описанию которой ниже мы посвятим отдельную главу, ру-

ководители «Cataract Construction Co» энергично принялись за строительство станции. Фирме Вестингауз были заказаны три двухфазных генератора по 5 000 л. с. каждый, а фирме Фэт и Пиккар — гидротурбины по 5 150 л. с. В короткий срок были выполнены большие строительные работы, и в ноябре 1896 г. «под гром пушек и при всеобщем ликовании» невиданная до тех пор по размерам и мощности гидроэлектростанция была открыта.

Еще в период строительства электростанции выяснилось, что спрос на электроэнергию в этом районе будет очень велик, и проектная мощность станции оказывалась недостаточной. Поэтому сразу же началось расширение станции, и к началу текущего столетия число агрегатов было увеличено до восьми, а общая мощность возросла до 40 000 л. с.

Пример Ниагарской гидроэлектростанции показывает, что с первых шагов крупного гидроэлектростроительства дешевая энергия получила широкое применение на электрохимических и электротермических заводах, т. е. там, где электроэнергия играет роль основного технологического фактора. Так, первыми основными потребителями электроэнергии, производимой Ниагарской гидроэлектростанцией, стали заводы по производству карборунда (потребляемая мощность 2 000 л. с.), алюминия (3 000 л. с.), карбида кальция (до 15 000 л. с.), щелочных солей и белильных веществ (2 000 л. с.) и др. Часть энергии передавалась в города Буффало, Тонаванда и Локпорт при напряжениях 11 и 22 кв.

Так в последнее десятилетие прошлого века была построена первая и единственная крупная электростанция двухфазного тока. Нет более строгого и беспристрастного судьи, чем время. После 1891 г. замечательные свойства трехфазного тока привлекли к себе всеобщее внимание. В Соединенных Штатах этим родом тока весьма заинтересовалась фирма «General Electric Co», та самая фирма, основатель которой Томас Альва Эдисон отказался в 1889 г. от приглашения познакомиться с работами М.О.Долливо-Добровольского, воскликнув: «Нет, нет, переменный ток это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока,

но и знать о нем» [Л. 37]. Тем не менее, уже в середине 90-х годов фирма Эдисона строила крупные станции трехфазного тока.

Фирма Вестингауз, владевшая патентами Т е с л а, вынуждена была постепенно тоже перейти к трехфазному току. И никто иной, как бывший сотрудник Тесла Ч. Скотт, изобрел известный «трансформатор Скотта» для преобразования двухфазного тока в трехфазный, чтобы хотя на время спасти свою фирму от конкуренции, оттянув перестройку сетей на трехфазный ток. Трансформаторы Скотта были установлены и на Ниагарской станции с тем, чтобы линию, идущую в Буффало, питать трехфазным током.

На этом можно было бы закончить рассмотрение ранних работ в области многофазных систем. Однако то обстоятельство, что в некоторых литературных источниках в качестве одного из основоположников техники трехфазного тока называется шведский инженер Ионас Венштрём, заставляет нас кратко познакомиться с его работами и выяснить его место среди других изобретателей.

Венштрём 9 апреля 1890 г. подал патентную заявку на «Усовершенствования, касающиеся трансформации и распределения энергии посредством переменных электрических токов». На это изобретение в том же году был выдан английский патент № 5423. Рассмотрим содержание этого патента.

Венштрём, предполагая известными свойства вращающегося магнитного поля, описывает трехфазную цепь, трехфазный синхронный генератор и трехфазные трансформаторы и двигатели. Он также указывает две возможные схемы соединений в трехфазной цепи: в треугольник и звезду. Для преобразования трехфазного тока в постоянный Венштрём вслед за Хазельвандером предлагал применять синхронный коммутатор с тремя пластинами.

Легко установить, что синхронный трехфазный генератор Венштрёма повторяет изобретения Бредли и Хазельвандера. Двигатель Венштрёма имел выступающие полюса на статоре (рис. 2-19). Конструкция ротора в патенте не описывается. Наконец, трехфазные трансформаторы с симметричными магнитопроводами радиального и призматического типов, которые описывает Венштрём, были уже

запатентованы М.О.Доливо-Добровольским (см. приложение). Следует также отметить, что в заявке Доливо-Добровольского № 19554, поданной в английское патентное ведомство 5 декабря 1889 г., были уже описаны основные схемы соединений трехфазных машин.

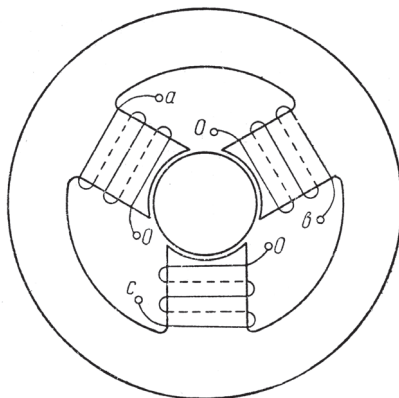


Рис. 2—19. *Схема трехфазного двигателя Венстрёма.*

Изучение патента Венстрёма показывает, таким образом, что шведский ученый не может претендовать на приоритет в каком-либо из указанных изобретений. Работа Венстрёма только лишний раз свидетельствует об интернациональном характере исследований в области многофазных систем. Она, кроме того, оказала немалую услугу известной шведской фирме АСЕА, возникшей как акционерная компания для эксплуатации изобретений Венстрёма. Владея рассмотренным выше патентом, эта фирма очень быстро и независимо от иностранных электротехнических компаний стала развивать технику трехфазного тока.

Теперь мы можем подвести итоги. Экономические условия 80-х годов прошлого столетия настоятельно требовали решения проблемы централизованного производства в крупных масштабах электроэнергии и передачи ее на большие расстояния. В ответ на насущные потребности производства в умах ученых уже вызревали идеи новой системы электрических токов, системы, которая позволяла бы

легко трансформируемый переменный ток широко использовать для питания электродвигателей. В лабораториях институтов и заводов различных стран создавались первые конструкции многофазных машин.

Отдельное направление в изучении многофазных систем представляли работы Феррариса, Шалленбергера, Ютена и Леблана, Бруна и др. Это направление характеризовалось попытками использовать существовавшие сети однофазного тока и центральной идеей его было использование искусственной фазы.

Другое направление было представлено трудами Бредли, Хазельвандера, Тесла и других ученых и инженеров. Это, второе, направление характеризовалось попытками комплексного решения задачи электроснабжения на базе многофазной системы токов. Разрабатывались различные конструкции многофазных генераторов и двигателей, различные схемы многофазных цепей.

Ближе всех к практическому решению задачи подошел Тесла, однако он остановился перед определенными трудностями технического, теоретического и экономического порядка. Эти трудности заставили его прекратить работы в области многофазных систем.

По существу, в тот же период, к которому относятся наиболее важные выступления Тесла, развернулась кипучая и плодотворная деятельность во Всеобщей компании электричества Михаила Осиповича Доливо-Добровольского. Начав с изучения доклада Феррариса и критики конструкций машин Тесла, он в короткий срок разработал все основные детали новой системы электроснабжения. Он дал такие конструктивные решения, которые выдержали более чем полувековое испытание.

Одной из решающих причин успеха Доливо-Добровольского являлось чрезвычайно удачное сочетание в его творчестве научного провидения и инженерного подхода к решению задачи. До некоторой степени это был синтез изобретательской интуиции, которой так щедро природа одарила Эдисона, и широкого научного размаха, столь характерного для Тесла. Только соединение этих замечательных качеств позволило одному человеку сделать вклад в науку и технику, который, казалось бы, мог быть посильным только большому коллективу.

«НАУКУ И ТЕХНИКУ НАДО ИЗОБРАЖАТЬ НЕ КАК СКЛАД ГОТОВЫХ ОТКРЫТИЙ И ИЗОБРЕТЕНИЙ, А КАК АРЕНУ БОРЬБЫ, ГДЕ КОНКРЕТНЫЙ ЖИВОЙ ЧЕЛОВЕК ПРЕОДОЛЕВАЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА И ТРАДИЦИИ».

М.Горький

ГЛАВА III

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ТОКОВ

Знакомство с работой Феррариса. Беличья клетка. Переход к трехфазной системе. «Drehstrom». Трехфазные асинхронные двигатели. Трехфазные трансформаторы. Четырехпроводная цепь трехфазного тока. Основы теории переменного тока

«Интенсивное развитие промышленности вообще и электротехники в особенности все чаще и в больших масштабах приводит к использованию электрической передачи энергии. Ко времени Мюнхенской электрической выставки все с большой радостью приветствовали опыты Марсея Дебре и уже тогда предвидели, что «новорожденное дитя» в будущем быстро и пышно разовьется. Так как в последующие годы в этой области не появилось никаких крупных открытий, наступил застой»... Этими словами М.О.Доливо-Добровольский начал свою статью, в которой он впервые для широких кругов электриков изложил существо сделанных им изобретений в области трехфазной системы [Л. 4]. Такое начало свидетельствует о том, что основной проблемой, для решения которой Доливо-Добровольский предназначал свои изобретения, была проблема электропередачи.

Только впоследствии, когда были выяснены превосходные качества всех элементов трехфазной системы, трехфазный ток получил полные права гражданства и проник почти во все сферы производственной деятельности.

Летом 1888 г. Доливо-Добровольский познакомился с известной нам работой Феррариса. Он пока еще интуитивно почувствовал важность и научную ценность открытия Феррариса, но был весьма удивлен заключительной частью работы. Читатель помнит, что в этой части Феррарис свел на нет значение вращающегося магнитного поля для электромашиностроения, заявив, что индукционный двигатель принципиально не может иметь к. п. д. выше 50 %.

Доливо-Добровольский к этому времени накопил уже определенный опыт работы по проектированию, изготовлению и испытаниям электрических машин. Он, в частности, заметил, что использование машины значительно повысилось бы, если обмотку якоря разделить на несколько фаз, как это делали еще Грамм и Яблочков. Это позволило бы в прежних габаритах машины получить увеличенную мощность. Однако тогда эти мысли Доливо-Добровольского не были еще достаточно оформившимися и остались нереализованными. С другой стороны, в опытах динамического торможения, когда он замыкал накоротко обмотку двигателя постоянного тока при полном его возбуждении, Доливо-Добровольский наблюдал возникновение тормозящего момента огромной величины. И если первое наблюдение, касающееся разделения обмотки на несколько фаз, вызвало у него сочувственное отношение к идее Феррариса, то второе наблюдение его насторожило и заставило подвергнуть критическому анализу теоретические выводы итальянского ученого.

Впоследствии Михаил Осипович так описывал свои рассуждения по этому поводу: «Я тотчас же сказал себе, что если сделать вращающееся поле по методу Феррариса и поместить в него такой короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то этот якорь скорее сам сгорит, чем будет вращаться с небольшим числом оборотов. Во всяком случае он должен будет при весьма малой относительной скорости вращения развить громадную силу. Мысленно я пря-

мо представил себе электродвигатель многофазного тока с ничтожным скольжением» [Л. 37].

Так был сделан первый шаг в истории техники трехфазного тока, который замечательно характеризует инженерный образ мышления Доливо-Добровольского: вспомним, что у Феррариса ротор представлял собой медный цилиндр без обмотки, а первая же мысль Доливо-Добровольского дала правильное направление к целесообразной конструктивной разработке асинхронного двигателя.

Действительно, сделав приведенное выше предположение, Доливо-Добровольский рассудил, что возникающий уже при небольшом скольжении весьма значительный ток в коротко замкнутом роторе вызовет в достаточно сильном поле возбуждения большой вращающий момент, который при большой окружной скорости ротора даст значительную полезную мощность. Едва ли стоит упоминать о том, что при ничтожном скольжении не может быть и речи о таком низком к. н. д., какой предсказывал Феррарис.

Усиленная работа в выявленном уже направлении привела Доливо-Добровольского в необычайно короткий срок к совершенной, в принципе не изменившейся до сегодняшнего дня конструкции асинхронного электродвигателя и к оптимальному варианту многофазной системы — системе трехфазных токов.

Фирма АЭГ вначале не сумела оценить важности работ Доливо-Добровольского и пожелала сделать патентную заявку лишь после того, как из опытов «что-нибудь выйдет» [Л. 37]. Сконструированный трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный одноякорный преобразователь были испытаны весной 1889 г. и 8 марта, наконец, Доливо-Добровольский от имени фирмы сделал патентную заявку на трехфазную систему. Но это дело было настолько ново, что патентное ведомство в лице своих экспертов не могло быстро разобраться в новом изобретении и требовало многих уточнений. Пока тянулись эти переговоры и делались многочисленные уточнения, в июне 1889 г., как мы уже знаем, была запатентована система Хазельвандера (тот патент, который позднее был ликвидирован на основе патентов Бредли и Тесла). Поэтому Доливо-Добровольскому

в Германии был выдан только частичный патент на «якорь для двигателей переменного тока» (№ 51083), в котором были описаны различные конструкции короткозамкнутых роторов («беличья клетка»). На генерирование и распределение трехфазного тока Доливо-Добровольский получил патенты в Англии, Швейцарии и России (см. приложение II). Таким образом были сохранены документальные материалы, позволяющие изучить первые работы Доливо-Добровольского в области техники трехфазного тока. Хронологически труды, которыми были созданы все основные элементы системы трехфазного тока, вписываются в период 1888–1891 гг.

Итак, первым шагом Доливо-Добровольского в области техники трехфазного тока было создание конструкций короткозамкнутых роторов. Вначале он предполагал, что в качестве такого ротора можно использовать якорь обычной машины постоянного тока. Для опытных экземпляров достаточно было замыкать накоротко коллектор при помощи медного бандажа. Однако стремление сделать скольжение ротора относительно вращающегося поля по возможности малым заставило Доливо-Добровольского усовершенствовать конструкцию короткозамкнутого ротора. Ход его мыслей в этом направлении легко проследить, внимательно ознакомившись с текстом патентного описания.

На рис. 3-1 представлены чертежи, приложенные к германскому патенту № 51083. Описывая способ получения вращающегося магнитного поля, предложенный Феррарисом, Доливо-Добровольский указывает, что в двигателе Феррариса с вращающимся полем взаимодействовали токи, индуцированные в медном цилиндре. Но медь плохой проводник для магнитного потока статора, и к. п. д. такого двигателя был бы низким. Если же медный цилиндр заменить стальным, то магнитный поток резко возрастет, но сталь будет плохим проводником для индуцированных в роторе токов. Поэтому в качестве выхода из этого противоречия Доливо-Добровольский предлагает выполнять ротор в виде стального цилиндра (что ведет к уменьшению магнитного сопротивления ротора) и в просверленные по периферии последнего отверстия закладывать медные стержни

(что ведет к уменьшению электрического сопротивления ротора). На лобовых частях ротора эти стержни должны быть хорошо электрически соединены друг с другом.

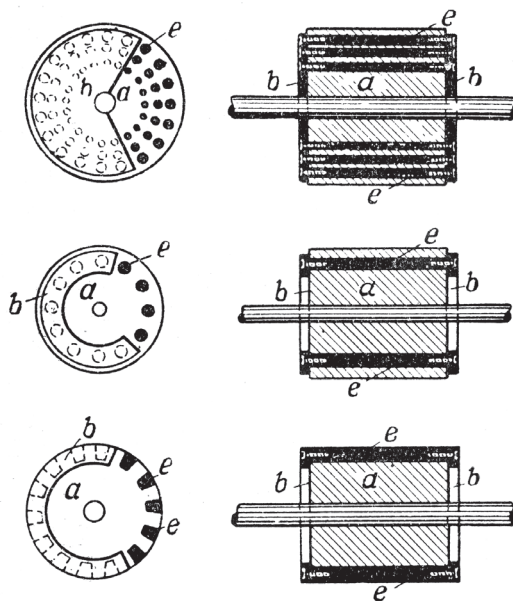


Рис. 3—1. Роторы с обмоткой в виде беличьей клетки
(из германского патента №51083).

Возможно несколько различных вариантов исполнения такого ротора. Два верхних чертежа изображают ротор с тремя рядами медных стержней *e*, соединенных друг с другом медными пластинами *b*; далее показан ротор с одним рядом стержней *e*, замкнутых плоскими кольцами *b*; наконец, нижние чертежи изображают ротор с медными стержнями прямоугольного сечения, уложенными в пазы. Другими словами, на приведенных иллюстрациях изображены различные варианты однорядной и многорядной «беличьих клеток».

Доливо-Добровольский, как обычно это делалось в патентных описаниях, предусматривает все возможные конструктивные исполнения двигателя: последний может быть двух- и многополюсным;

часть двигателя с описанной короткозамкнутой обмоткой может быть не только вращающейся, но и неподвижной; вместо стержней могут применяться медные ленты или медная проволока. Ротор может быть выполнен также в виде стального цилиндра с медным гальваническим покрытием. Доливо-Добровольский отметил, что изоляция медных стержней от железа не является обязательной. С другой стороны, понимая, что сталь ротора перемагничивается лишь с незначительной частотой скольжения, что, следовательно, потери на вихревые токи и гистерезис очень малы, Доливо-Добровольский считал также не обязательным набирать сердечник ротора из отдельных пластин, иначе говоря, он указывал на возможность изготовления массивного ротора с неизолированными стержнями. Ниже мы еще вернемся к этой мысли Доливо-Добровольского.

На рис. 3-2 представлен внешний вид одной из ранних конструкций «беличьей клетки».

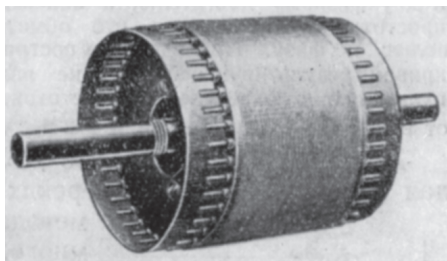


Рис. 3—2. Одна из первых конструкций «беличьей клетки».

Естественным побуждением Доливо-Добровольского было поместить свой короткозамкнутый ротор во вращающееся поле, полученное по методу Феррариса или Тесла. Конструктивные формы асинхронного двигателя в принципе были уже известны. При выполнении необходимых условий, как это строго математически доказал Феррарис, должно было получаться круговое вращающееся поле. Но при более детальном рассмотрении Доливо-Добровольский обнаружил, что в реальной машине вращающееся поле будет отличаться от идеального кругового поля. Здесь в яркой форме проявилась

его способность проникать в сущность сложных физических явлений без привлечения громоздкого математического аппарата. Это тем более удивительно, что в те времена только зарождались элементарные представления о процессах в электрических машинах переменного тока.

Ныне мы знаем, что если намагничивающие силы (н.с.) отдельных фаз в машине распределяются по окружности статора синусоидально (как это, впрочем, и принимал Феррарис), то и результирующая н.с. будет синусоидальной. Амплитуда результирующей н.с. в двухфазной машине всегда равна амплитуде н.с. одной фазы, а в трехфазной — равна $3/2$ амплитуды н.с. одной фазы. Но в реальной машине н.с. отдельных фаз никогда не распределяются по закону синуса. Это было бы возможно только в том случае, если бы густота проводников каждой фазы менялась вдоль воздушного зазора по закону синуса, да и то в реальной машине н.с. менялась бы не строго синусоидально, а скачками от паза к пазу, но все же близко к синусоиде. В нормальных машинах н.с. может распределяться либо по прямоугольнику (один виток на фазу), либо по трапеции, в той или иной степени приближающейся к синусоиде в зависимости от соотношения ширины катушки и полюсного деления.

Рассматривая кривые изменения токов в двухфазной системе и полагая, что эти кривые в ином масштабе представляют кривые изменения н.с., Доливо-Добровольский пришел к следующему выводу. Если в реальной машине распределение н.с. в пространстве не соответствует принятому Феррарисом синусоидальному закону, то амплитуда результирующей н.с. должна изменяться от значения Θ_m до $\sqrt{2}\Theta_m$ (рис. 3-3), где Θ_m — амплитудное значение н.с. одной фазы. Это рассуждение Доливо-Добровольского, учитывающее изменения н.с. только во времени, справедливо лишь для случаев прямолинейных распределений н.с. в пространстве (прямоугольник или трапеция). Как указано выше, при синусоидальном распределении н.с. пульсаций амплитуды результирующей н.с. не будет.

Для того чтобы легче было уяснить природу этих пульсаций, вспомним графический метод построения кривых н.с. На рис. 3-4,а

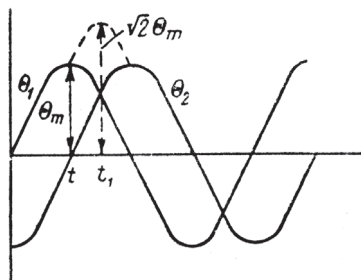


Рис. 3—3. Намагничивающие силы в двухфазной машине.

представлено построение кривой н. с. для двухфазного двигателя, а на рис. 3-4,б — для трехфазного двигателя (индексы I и II относятся к двухфазному двигателю, а индексы A, B, C — к трехфазному). Для простоты предполагается, что обмотка статора имеет один виток на полюс и фазу. Приведенное построение показывает, что амплитуда кривой результирующей н. с. не является постоянной величиной; она пульсирует с определенной частотой, изменяясь в двухфазной машине от величины Θ_m до величины $\sqrt{2}\Theta_m$, а в трехфазной от $\sqrt{3}\Theta_m$ до $2\Theta_m$.

Достоинно удивления, что Доливо-Добровольский, не обладая в период своих пионерских работ практически никакими методами анализа кривых н. с. в многофазных машинах (так называемый «многоугольник ГЕРГЕСА» появился позднее), сумел заметить пульсации н. с. и доказать, что эти пульсации в двухфазной машине выражены более резко.

Но как пульсации н. с. отражаются на работе асинхронной машины? Доливо-Добровольский указывал, что для синхронного двигателя эти пульсации не имеют существенного значения, но совсем другое дело для асинхронного двигателя. Пульсации н. с., частота которых отличается от основной частоты, будут индуцировать токи соответствующей частоты в обмотке якоря. Доливо-Добровольский справедливо заключает, что в результате этого возникнут тормозящие моменты: «Я сказал себе, — писал он, — что чем далее я отойду от идеального случая вращающегося постоянного (т. е. кругового — O.B.)

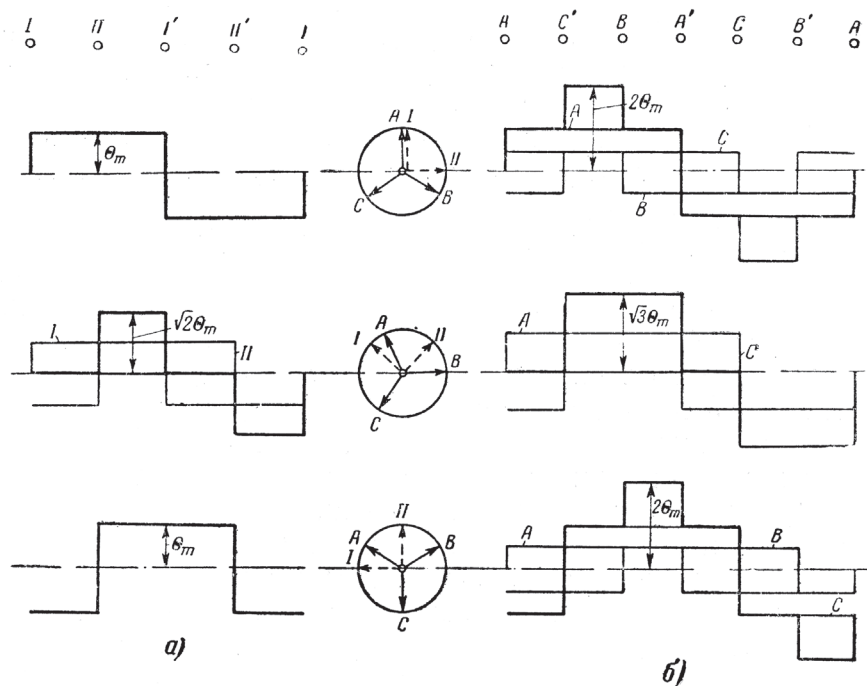


Рис. 3—4. Кривые н. с. для обмоток с одним витком на полюс и фазу.
а — двухфазный двигатель; б — трехфазный двигатель.

поля, чем больше произойдет отклонений в расположении и числе силовых линий, тем больше будет протекать в короткозамкнутом якоре бесполезных токов всякого рода и тем больший ущерб будет нанесен мощности и к. п. д.» [Л. 37].

Таким образом, пульсации н. с. в асинхронном двигателе ухудшают его характеристики. Перед Доливо-Добровольский встала задача найти удовлетворительное решение новой проблемы. Метод ФЕРРАРИСА, предполагавший создание искусственной фазы, только ухудшал положение, так как вращающееся поле у ФЕРРАРИСА заведомо не было круговым. ТЕСЛА строил двухфазные двигатели, но они имели большие пульсации н. с. Действительно, из рис. 3-4 следует, что эти пульсации составляют:

$$\frac{\sqrt{2}\theta_m - \theta_m}{\theta_m} 100 = 41,4 \, \%.$$

Нужно было увеличить число фаз. Но еще Тесла показал, что вместе с увеличением числа фаз возрастает число линейных проводов, которых было много уже при двухфазной системе, а, как известно, линейные устройства, в частности провода, составляют значительную долю стоимости всех сооружений электросистемы. Положение М.О.Доливо-Добровольского было, как видим, трудным, но его никогда не покидала надежда найти решение возникшей проблемы. Именно эта надежда и уверенность в успехе придавали ему бодрость всякий раз, когда физические силы, казалось, покидали его. Поскольку правление фирмы АЭГ еще не придавало значения этим работам Доливо-Добровольского и загружало его массой текущих дел, он имел возможность уделять интересовавшим его исследованиям лишь ночные часы, урывая их у сна. Но так или иначе эксперименты продолжались.

Доливо-Добровольский стремился создать такую конструкцию генератора переменного тока, которая могла быть легко получена путем простой перестройки машины постоянного тока. Этим он рассчитывал приобрести снисходительное отношение к своим работам со стороны правления фирмы, специализировавшейся на установках постоянного тока. Если бы его расчеты оправдались, то фирма более легко, без существенной перестройки технологии перешла бы на производство машин переменного тока.

Доливо-Добровольский обратился к известному уже способу получения переменного тока при помощи отводов от диаметрально противоположных (при двухполюсном исполнении) точек обмотки якоря машины постоянного тока. Добавив после некоторых размышлений еще два кольца, соединенных с двумя другими точками той же обмотки, равноудаленными от двух первых, он получил двухфазный ток. Но двухфазный ток по указанным выше причинам не мог его удовлетворить. Если выбрать трехфазную систему, то пульсации н. с. должны уменьшиться, но при сдвиге фаз

в 60° , как это было указано в некоторых патентах Тесла, получатся три независимые цепи, требующие шесть проводов. Конечно, столь большое число линейных проводов сводило на нет все другие преимущества увеличения числа фаз. Но может быть удастся как-нибудь получить тот же эффект с меньшим числом проводов? И Доливо-Добровольский вновь обращается к машинам постоянного тока.

«Постоянно размышляя таким образом над чертежами и схемами обмоток и протеканием токов, — писал Доливо-Добровольский, — я напал на мысль сделать ответвления от трех равностоящих точек якоря постоянного тока. Так появился трехфазный ток с тремя только проводами. Но получил я здесь разность фаз в 120° вместо 60° » [Л. 37].

Доливо-Добровольский еще не знал, что эта принципиальная схема трехфазного одноякорного преобразователя была описана Бредли, что о ней упоминал Тесла и что Хазельвандер в это время составлял свою патентную заявку. Не знали об этом и другие электрики, так как практического применения указанные работы еще не получили.

Первое знакомство с трехфазным током вызвало недоумение. Казалось необъяснимым, противоречащим всем привычным представлениям то обстоятельство, что по трем проводам могли течь три различных по фазе тока. Все электрики были воспитаны на том, что для каждого отдельного тока, который должен непрерывно циркулировать, требуется двухпроводная замкнутая цепь.

М. О. Доливо-Добровольский показал, что система трех токов с разностью фаз в 120° обладает замечательным свойством: сумма всех трех токов в такой связанной, или, как говорил Доливо-Добровольский, «сопряженной» цепи в любой момент времени равна нулю. Таким образом, каждый провод являлся в каждый момент времени обратным для двух других токов, ибо если

$I_1 + I_2 + I_3 = 0$, то, например, $-I_1 = I_2 + I_3$ или $-I_2 = I_1 + I_3$, т. е. ток в каждом проводе в любой момент равен сумме двух других токов и имеет противоположное им направление.

Для большей наглядности Доливо-Добровольский демонстрировал всем интересовавшимся очень простое и оригинальное устройство, наглядно воспроизводившее одновременное, но различное по фазе изменение мгновенных значений всех трех токов в его системе [Л. 122]. Это устройство (рис. 3-5) состояло в следующем. За заштрихованной шайбой вращалась другая шайба с нанесенными на ней тремя жирными линиями, расположенными под углом в 120° друг к другу (линии OA_1 , OA_2 и OA_3). На передней (заштрихованной) шайбе были вырезаны два отверстия с диаметрами, равными амплитудному значению тока, который изменялся, например, для фазы A_1 по закону $i = I_m \sin \omega t$, а для остальных фаз со сдвигом по времени на $\pm 120^\circ$. Тогда при вращении задней шайбы с угловой скоростью ω видимые отрезки линий OA_1 , OA_2 и OA_3 , отмеченные на рисунке буквами Oa_1 , Oa_2 и Oa_3 , изображали в каждый момент мгновенные значения тока в каждой фазе. Условно можно было считать, что, например, в верхнем отверстии мгновенные значения принимают положительные значения, а в нижнем — отрицательные.

Но, пожалуй, самым удивительным и, казалось, непостижимым устройством, связанным с трехфазным током, была построенная

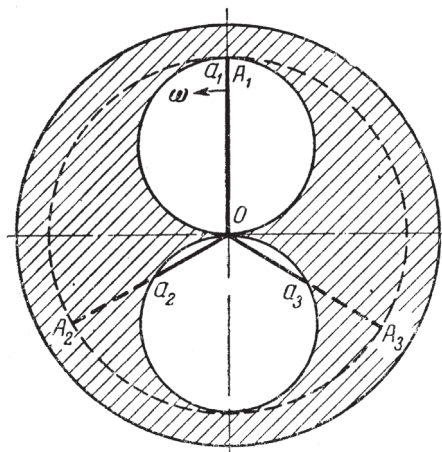


Рис. 3—5. К иллюстрации изменений мгновенных значений токов в трехфазной системе.

Доливо-Добровольским трехфазная ... лампа. В этой лампе, созданной исключительно с целью демонстрации необычных свойств трехфазного тока, три нити соединялись в звезду или треугольник (рис. 3-6). Позднее многочисленные посетители Франкфуртской электротехнической выставки с интересом рассматривали такие лампы, которые были изготовлены не только Доливо-Добровольским, но уже и фирмой Сименс-Гальске. Последняя фирма вначале придавала этим лампам серьезное значение, полагая, что в их применении заключено решение вопроса о равномерности нагрузки отдельных фаз [Л. 123]. Две трехфазные лампы фирмы Сименс-Гальске демонстрировались также в 1892 г. на Петербургской электротехнической выставке [Л. 124].

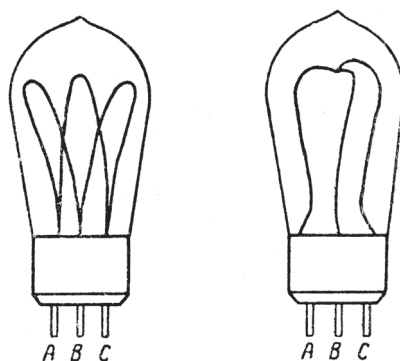


Рис. 3—6. Трехфазные лампы.

Итак, трехфазный ток был получен и притом получен весьма просто, путем добавления к обычной машине постоянного тока трех колец. Понятно, что по такой же схеме можно было построить не только одноякорный преобразователь, но и просто синхронный генератор. На трехфазные генераторы М.О.Доливо-Добровольский, как уже указывалось, получил русский, швейцарский и английский патенты.

В патентных описаниях он указывает на недостатки двухфазной системы Тесла, подвергает критике схемы несвязанных многофазных цепей и противопоставляет им свою *связанную* цепь трехфазно-

го тока. Доливо-Добровольский так и говорит, что в его изобретении «катушки каждой машины, вместо того, чтобы быть независимыми друг от друга, как в прежних устройствах, электрически соединяются друг с другом...» [Л. 125].

При трех катушках на якоре генератора, как объясняет Доливо-Добровольский, все цепи зависят друг от друга, и каждый провод в любой момент является обратным для двух других. Токи по фазе сдвинуты таким образом, что их сумма во всех трех катушках в любой момент времени равна нулю. Учитывая это последнее свойство связанной системы трехфазного тока, можно производить соединение катушек генератора двумя путями: каждая катушка включается параллельно двум другим («треугольник») или каждая катушка соединяется последовательно с двумя другими («звезда»). «Эти схемы, — замечает в другом месте Доливо-Добровольский, — аналогичны в том отношении, что все, что относится в одной схеме к напряжению, в другой относится к току» [Л. 4]. Таким образом, он совершенно сознательно и отчетливо описал две основные схемы соединений в цепях трехфазного тока. На приложенных к патентам чертежах (рис. 3-7) показаны различные виды соединений трехфазных машин (в правой части всех чертежей показаны обмотки статора трехфазного двигателя). Первые четыре схемы иллюстрируют соединения обмоток генератора и двигателя в треугольник. Здесь также показано, что каждому определенному положению фазных обмоток генератора относительно полюсов соответствует определенное направление магнитного потока в двигателе.

На схемах 5 и 6 обмотки генератора и двигателя соединены в звезду; на схеме 7 обмотка генератора соединена в треугольник, а двигателя — в звезду; на схеме 8 показано соединение обмотки генератора в звезду, а двигателя — в треугольник. Схема 9 изображает трехфазный синхронный генератор с двумя парами полюсов и двумя группами катушек.

Несмотря на предельную простоту приведенных выше схем и удобство изготовления обмоток трехфазных машин, Доливо-Добровольский не был полностью удовлетворен этими решениями.

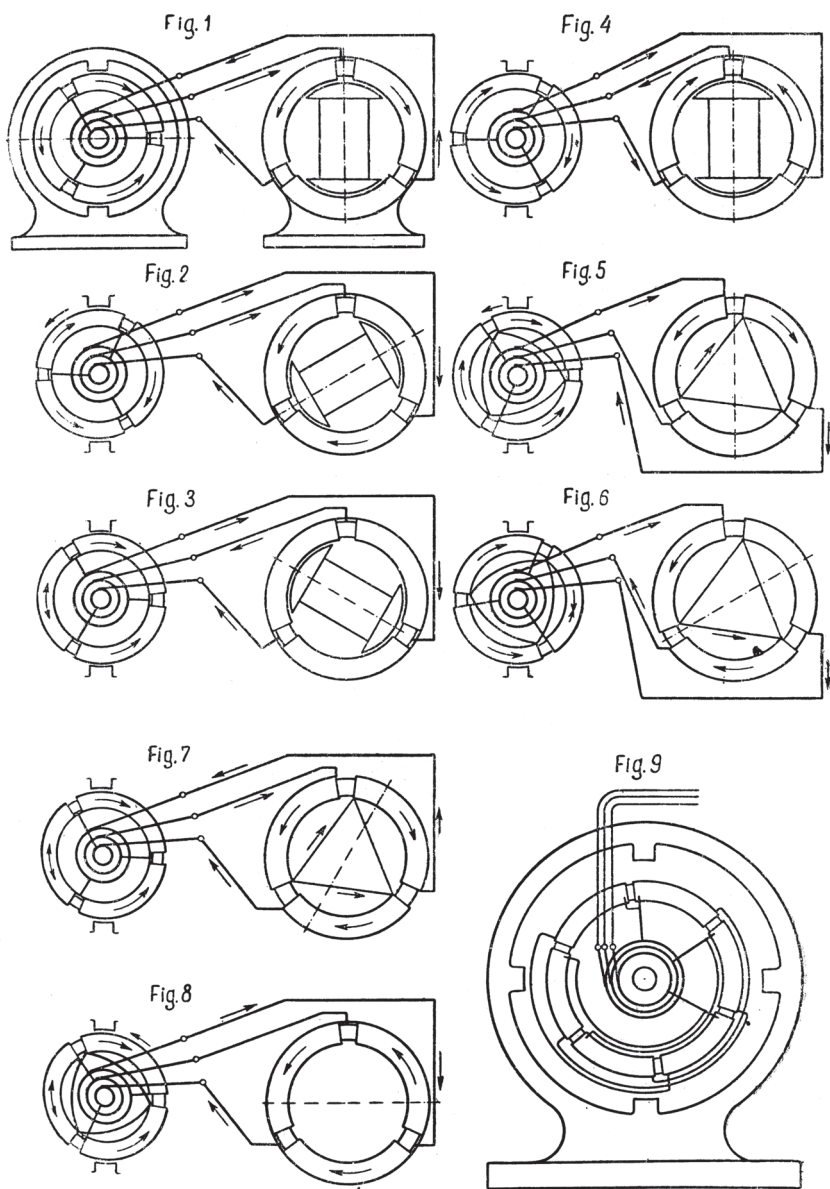


Рис. 3—7. Схемы соединений обмоток трехфазных машин.

Ему казалось, что он не выяснил еще всех возможностей трехфазных машин, и именно этим обстоятельством он склонен был объяснить недостаточное, по его мнению, использование обмоток. Действительно, дальнейшее изучение показало, что схему обмоток можно изменить. Катушки можно расположить таким образом, что токи соседних катушек будут отличаться друг от друга по фазе на 60° , тогда как между линейными токами сохраняется разность фаз 120° . Это достигалось благодаря тому, что обмотки делались разрезными, и противолежащие катушки соединялись, навстречу друг другу (рис. 3-8). Этот метод улучшения использования обмотки получил широкое распространение.

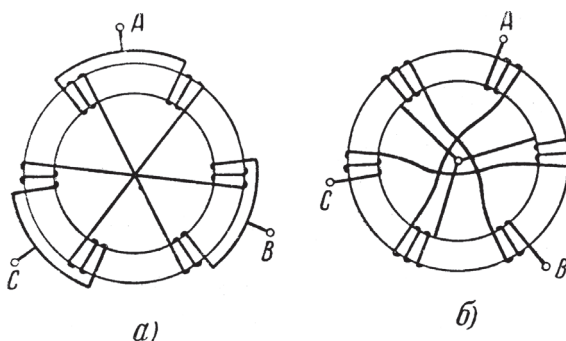


Рис. 3—8. Разрезная обмотка статора. а — соединение треугольником; б — соединение звездой.

Своеобразный характер взаимной связи между токами в многофазной системе, особые ее свойства, столь не сходные с привычными свойствами постоянного и однофазного переменного токов и, в частности, возможность при помощи многофазных токов создавать вращающееся магнитное поле, побудили М.О.Доливо-Добровольского предложить даже новый термин, характеризующий новую систему.

Совокупности «сопряженных» токов, т. е. токов, отличающихся друг от друга только на определенный фазный угол, было дано вначале наименование «Wechseldrehstrom» («вращающийся переменный

ток»), а затем просто «Drehstrom», что означает в переводе на русский язык «вращающий ток». Термин «Drehstrom», которым впоследствии стали обозначать трехфазный ток, сохранился в немецкой литературе до настоящего времени.

Доливо-Добровольский дал следующее определение: «Drehstrom есть... пучок переменных токов, фазы которых следуют друг за другом таким образом, что угол фазного сдвига, помноженный на число токов, дает в итоге 180° или, соответственно, 360° » [Л. 6]. Таким образом, наименьшее число токов может быть два со сдвигом фаз в 90° (при сдвиге фаз в 180° получаются два взаимно-противоположных тока, магнитные действия которых взаимоуничтожаются).

Наиболее целесообразной, по глубокому убеждению М.О.Доливо-Добровольского, следует считать совокупность трех токов с разностью фаз 120° , т. е. трехфазную систему. Эта система является *оптимальной*. Как было указано выше, Доливо-Добровольский доказал, что при трехфазной системе значительно уменьшаются пульсации н. с. в асинхронном двигателе: если в двухфазном двигателе они составляют 41,4 %, то в трехфазном (рис. 3-4):

$$\frac{2\theta_m - \sqrt{3}\theta_m}{\sqrt{3}\theta_m} 100 = 15,5 \, \%.$$

При достаточном насыщении машины такие пульсации не могут оказать существенного влияния на ее работу. Идти дальше в сторону увеличения числа фаз Доливо-Добровольский считал нецелесообразным, так как это привело бы к увеличению числа линейных проводов. Едва ли стоило ради незначительного улучшения технических характеристик машин сознательно соглашаться на существенное удорожание линий электропередачи.

С другой стороны, трехфазная система довольно неожиданно раскрыла еще одну замечательную свою особенность. Оказалось, что *на три* провода трехфазной линии при прочих равных условиях требовалось меди меньше, чем *на два* провода однофазной линии. Доливо-Добровольский показал, что мощность в трехфазной

системе при активной нагрузке $P = \sqrt{3}UI$, если U и I – линейные напряжения и токи. Известно, что в однофазной цепи $P' = U'I'$. Таким образом, если бы были построены две линии равной длины, по которым должна быть передана одинаковая мощность при равных напряжениях и потерях и из которых одна была бы однофазной, а другая трехфазной, то ток в первой линии должен быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем во второй. Отсюда легко подсчитать, что сечение провода в трехфазной линии может быть взято вдвое меньшим, чем в однофазной, следовательно, общий вес проводов трехфазной линии на 25 % меньше веса проводов однофазной линии. А поскольку мы приняли, что нагрузка является только активной, то приведенный вывод можно распространить и на сравнение трехфазной линии с линией постоянного тока.

Нужно отметить, что эта очевидная и существенная экономия в проводниковой меди в значительной степени способствовала в свое время решению вопроса о выборе системы тока в пользу трехфазной системы.

В результате напряженной и плодотворной работы М.О.Доливо-Добровольского в непостижимо короткий срок были найдены принципиальные схемы генераторов, цепей и двигателей трехфазного тока. Сам изобретатель придавал исключительно большое значение именно последнему элементу системы – асинхронному двигателю: «...трехфазный ток обязан своим правом на существование электродвигателям совершенно независимо от вопроса передачи на большие расстояния, – говорил Доливо-Добровольский в 1900 г. – Многие десятки тысяч лошадиных сил в трехфазных двигателях работают в настоящее время в промышленности прямо в соединении с генераторами низкого напряжения...» [Л. 29].

Познакомимся теперь с тем, что собой представляли первые асинхронные двигатели М.О.Доливо-Добровольского в конструктивном отношении, каковы были их свойства и характеристики.

Для самого первого двигателя, который был построен зимой 1888/89 г., в качестве статора было использовано обычное кольцо Пачинотти-Грамма с 24 полужакрытыми пазами (рис. 3-9).

Здесь уже были учтены ошибки Тесла, и обмотка статора была выполнена не сосредоточенной, а размещенной в пазах по всей окружности статора, что давало, безусловно, более благоприятное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. В порядке исследований при помощи переключений обмотки машину можно было делать двух- и четырехполюсной, двухфазной, трехфазной и при желании даже шестифазной или 12-фазной. Ротор был выполнен с обмоткой в виде беличьей клетки, причем из-за опасения «прилипания» были изготовлены два ротора: с 24 и 25 пазами (пазы были закрытыми). Воздушный зазор был взят около 1 мм, что по тому времени считалось очень смелым решением, так как обычно в машинах постоянного тока зазор был много больше. Стержни беличьей клетки не имели никакой изоляции.

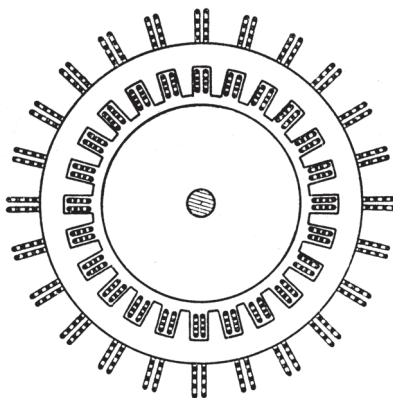


Рис. 3—9. Статор с кольцевой обмоткой.

Этот первый асинхронный двигатель, внешний вид и отдельные части которого показаны на рис. 3-10, был приведен в действие от трехфазного одноякорного преобразователя, полученного путем известной перестройки восьмиполюсного двигателя постоянного тока мощностью, несколько большей 2 квт.

О впечатлении, произведенном первым запуском трехфазного асинхронного двигателя, лучше всего сказал сам Доливо-Доброволь-

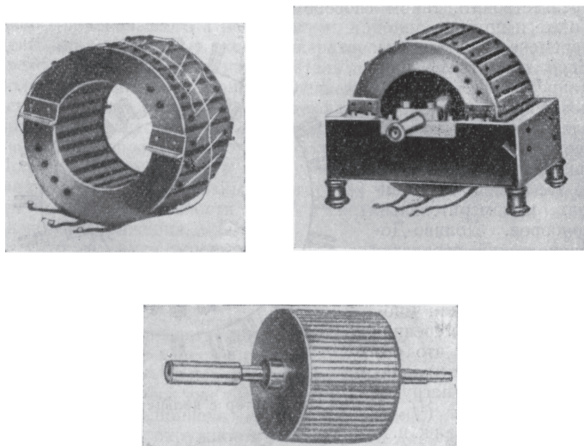


Рис. 3—10. *Первый трехфазный асинхронный двигатель М.О.Доливо-Добровольского.*

ский: «Уже при первом включении выявилось ошеломляющее для представлений того времени действие. Электродвигатель, якорь которого имел диаметр около 75 мм и длину также около 75 мм и не обладал никакими особыми присоединениями к сети, мгновенно стал вращаться на полное число оборотов и был совершенно бесшумным. Попытка остановить его торможением за конец вала от руки блестяще провалилась, и только при особой ловкости было возможно воспрепятствовать таким способом его запуску при включении. То же и при внезапной перемене хода машины. Если принять во внимание малые размеры моторчика, это представлялось чудом для всех приглашенных свидетелей» [Л. 37].

Не имея подходящих измерительных приборов, Доливо-Добровольский переделал в ваттметр электродинамометр Сименса и тщательными и многократными измерениями установил, что его маленький электродвигатель при нагрузке от 70 до 90 *вт* ($\frac{1}{10} - \frac{1}{8}$ л. с.) показал к. п. д. около 80%¹. Он также провел многочисленные исследо-

¹ Коэффициент полезного действия двигателей постоянного тока соответствующей мощности составлял тогда величину порядка 70 %.

вания этого двигателя, варьируя частоту, схему соединений статорной обмотки и т. д.

Теперь уже фирма заинтересовалась работами Доливо-Добровольского, и ему было предложено построить более мощный электродвигатель. Был сконструирован асинхронный двигатель примерно на $3,7 \text{ квт}$ с ротором, набранным из стальных листов. Этот двигатель питался от нового одноякорного преобразователя с барабанной обмоткой мощностью $10-15 \text{ квт}$. Статор двигателя был выполнен опять кольцевым. При пробном пуске оказалось, что двигатель обладал низким пусковым моментом, сильно вибрировал в течение всего пускового периода и производил большой шум, но при нормальной скорости работал хорошо. Доливо-Добровольский понял, что причина этой неудачи заключается в том, что короткозамкнутый якорь был, как он сформулировал, «слишком сильно замкнут накоротко». Это еще один пример того, как Доливо-Добровольский умел без какого-либо математического и графического анализа оценивать и понимать физическую сущность сложных процессов в электрической машине¹.

Доливо-Добровольский представил себе, что при очень коротком замыкании короткозамкнутого ротора в момент пуска двигатель ведет себя, как трансформатор в режиме короткого замыкания. В цепи ротора наводятся большие э. д. с., следовательно, и очень большие токи. Намагничивающая сила ротора в этом случае принимает такие размеры, что почти полностью уравнивает н. с. статора, и потребляемый при этом из сети громадный ток тратится почти исключительно на создание полей рассеяния, и в таком случае, как образно говорит Доливо-Добровольский, основное поле машины как бы «сдувается в сторону». При этом надо еще учесть, как это заметил Доливо-Добровольский, что статор с кольцевой обмоткой и без того

¹ Не следует забывать, что в тот период применения первых трехфазных асинхронных машин не было еще ни математического выражения зависимости момента вращения от величины активного сопротивления ротора, ни такого мощного графического средства анализа, как круговая диаграмма.

имел очень большое рассеяние (впоследствии благодаря определенным мероприятиям рассеяние такого рода статоров было значительно снижено).

Установив что «слишком короткое» замыкание обмотки ротора чрезвычайно сильно понижает пусковой момент, Доливо-Добровольский провел ряд экспериментов с двигателем, у которого менялось число витков обмотки ротора (практически менялось сопротивление, так как все лобовые части обмотки замыкались накоротко). Возникло противоречие: при большом сопротивлении обмотки ротора двигатель обладал хорошими пусковыми свойствами, но пониженными рабочими, а при малом сопротивлении резко ухудшались пусковые свойства, но рабочие характеристики были великолепными. Анализ возникших затруднений подсказал Доливо-Добровольскому выход из этого противоречия. Он пришел к мысли создать «переменную степень короткого замыкания». Эта идея была реализована в изобретении фазного ротора с кольцами и пусковыми устройствами. В декабре 1890 г. на это изобретение Доливо-Добровольский сделал патентные заявки в Швейцарии (№ 3062) и в Англии (№ 20425).

Рассмотрим швейцарский патент. В описании изобретения говорится, что в цепь ротора можно ввести определенной величины активное сопротивление в виде жидкости, ламп накаливания или металлического реостата. Регулируя таким образом ток в цепи ротора, можно не только создать наилучшие условия для пуска двигателя, но и практически в произвольных пределах регулировать его скорость (вниз от синхронной скорости). В качестве примера конструктивного выполнения пускорегулирующего устройства на приложенном к патенту чертеже (рис. 3-11) показан жидкостный пусковой реостат. Жидкостные реостаты М.О.Доливо-Добровольский применял еще ранее для пуска двигателей постоянного тока¹.

Может вызвать удивление то обстоятельство, что на рассматриваемом чертеже изображен двухфазный ротор. Однако изобретатель сам разъясняет, что ротор изображен двухфазным только для

¹ См. гл. 7.

примера и ради простоты и большей наглядности чертежа. Патентная формула охватывает любые многофазные машины, имеющие фазный ротор и пусковые устройства¹. Это изобретение М.О.Доливо-Добровольского с успехом применяется до настоящего времени.

Интересно отметить, что в том же патенте Доливо-Добровольский предлагал между прочим метод пуска двигателя, который предполагал включение в цепь ротора индуктивного сопротивления. В патентном описании указывается, что «...благодаря включенному сопротивлению, которое может состоять из металла, жидкости, ламп и т. д. или также из *индукционных катушек*, можно получить любую желаемую скорость и пусковое усилие...» (курсив мой. О. В.). Доливо-Добровольский понимал, конечно, что пуск при помощи активного сопротивления в цепи ротора требует затраты большой мощности, бесполезно теряемой в пусковом реостате. Индукционные же катушки поглощали малую мощность и понижали ток в роторной цепи. Но, с другой стороны, увеличение индуктивности в цепи ротора вызывало увеличение фазного сдвига между э. д. с. и током ротора, а это вело к снижению пускового момента. Вероятно, поэтому Доливо-Добровольский, хотя и предложил такой метод пуска асинхронных двигателей, но сам его в практических конструкциях не применял. Этот метод не нашел себе широкого применения и в последующее время.

Здесь уместно отметить, что необходимость иметь при реостатном пуске на валу двигателя контактные кольца несколько снижала достоинства индукционного двигателя и вызвала первоначально многочисленные нападки на систему Доливо-Добровольского (например, Броуна) даже независимо от того, что эти кольца и реостат работали только в течение пуска, после чего роторная обмотка замыкалась накоротко. Да и сам Доливо-Добровольский считал наличие контактных колец существенным недостатком двигателя, определенной уступкой техническим трудностям. Одним из наибо-

¹ Для первого двигателя с фазным ротором (3,7 квт) Доливо-Добровольский выбрал сразу же трехфазную обмотку.

лее существенных достоинств индукционного двигателя он считал как раз возможность устранить любые скользящие контакты. Как мы увидим ниже, Доливо-Добровольский в дальнейшем искал и находил пути улучшения условий пуска крупных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако и до сегодняшнего дня мы не имеем во многих случаях промышленного электропривода более совершенного устройства для пуска асинхронных двигателей большой мощности, чем реостат в цепи ротора, предложенный М.О.Доливо-Добровольским еще в 1890 г.

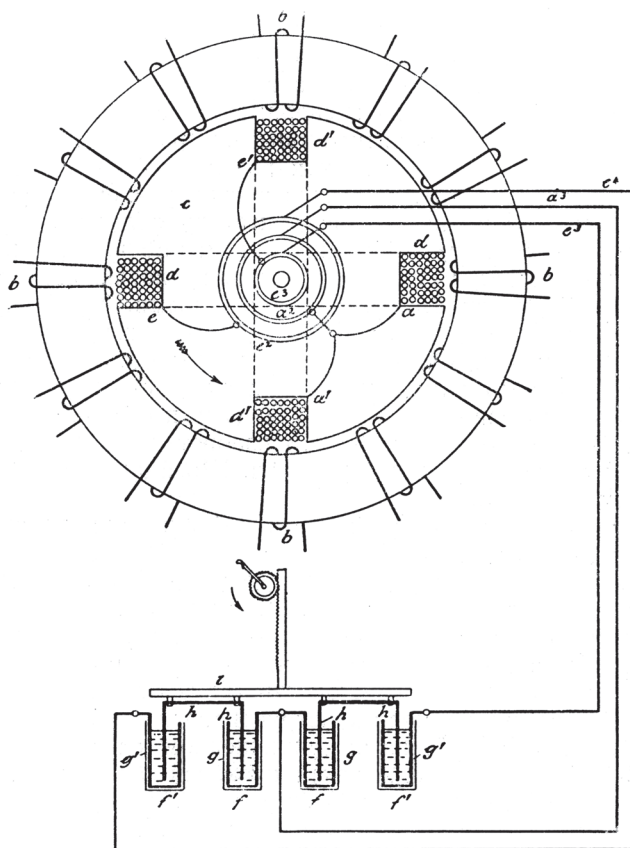


Рис. 3—11. Фазный ротор и пусковой реостат.

Как видно из вышеизложенного, первые машины Доливо-Добровольского были построены с кольцевой обмоткой статора, но он прекрасно понимал, что такая обмотка имеет очень большое магнитное рассеяние, и половина меди практически не используется. Представлялось весьма желательным сделать обмотку в машинах барабанной, но технология обмотки того времени была несовершенной, и попытки изготовить барабанную обмотку неизменно приводили к порче изоляции секций. Тем не менее Доливо-Добровольский построил в начале 1890 г. асинхронный двигатель мощностью порядка 1,5 *квт* (2 л. с.) с барабанной обмоткой. Этот двигатель, подтвердивший выдвинутые Доливо-Добровольским соображения относительно рассеяния, интересен еще и тем, что он был выполнен в «обращенной» форме: индуктирующая часть с барабанной обмоткой вращалась внутри индуктируемой части. В этом двигателе (рис. 3-12, *a*) для подвода тока необходимы были три контактных кольца, но они были небольшими, располагались за подшипником и во всяком случае были менее нежелательны, чем коллектор в машине постоянного тока. Внешняя часть была выполнена сначала с фазной обмоткой (рис. 3-12, *b*) и здесь для подключения пускового реостата колец не требовалось. Затем, когда выяснилось, что двигатель и без пускового реостата хорошо разгоняется, фазная обмотка индуктируемой части двигателя была заменена короткозамкнутой (рис. 3-12, *c*).

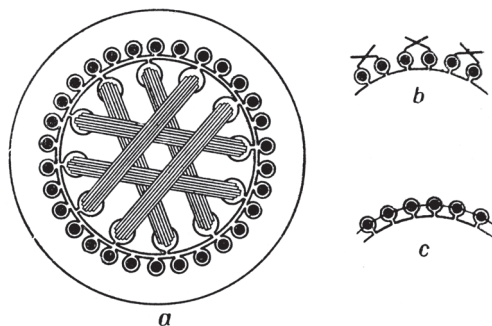


Рис. 3—12. Схематический вид асинхронного двигателя с барабанной обмоткой.

Интересно отметить, что, выполняя обращенный двигатель, Доливо-Добровольский ставил перед собой задачу снизить потери в стали. Он правильно рассудил, что объем стали внутренней части, перемещающейся с частотой сети, в этом случае меньше, следовательно, и потери в ней меньше, а внешняя часть перемещается с незначительной частотой скольжения, следовательно, и потери в ней будут незначительными.

Испытания этого двигателя дали весьма благоприятные результаты, особенно если учесть, что воздушный зазор составлял 1 мм. Двигатель без труда выдерживал двукратную перегрузку, что в те времена представлялось невероятным для машин переменного тока, и при номинальной нагрузке показали к. п. д. свыше 80 %. Максимальный к. п. д. был получен при нагрузке 1,7 кВт и составил 81,4 %. На рис. 3-13 представлены характеристики этого двигателя, снятые М.О.Доливо-Добровольским.

Все три первых двигателя, построенных Доливо-Добровольским (с короткозамкнутым ротором на 100 вт, с барабанной индуктирующей и короткозамкнутой вторичной обмотками на 1,5 кВт и с фазным ротором на 3,7 кВт), оказались на редкость удачными и показали весьма обнадеживающие результаты. Незаурядный талант конструктора в сочетании с исключительно тонким и глубоким пониманием физики процессов проявился в этих пионерских работах в области техники трехфазного тока. Промышленность получила асинхронный двигатель в двух его основных модификациях: с короткозамкнутым и с фазным роторами. Это были именно те двигатели, в которых ощущалась острая потребность.

Трехфазные двигатели Доливо-Добровольского оказались неизмеримо лучше двигателей Тесла и тем более любых других двигателей переменного тока. Много позже, когда М.О.Доливо-Добровольский оглядывался на пройденный путь, он говорил: «Раньше всех, по-видимому, практических результатов достигли Тесла у Вестингауза и я во Всеобщей компании электричества. И однако мы оба из одного и того же исходного пункта пошли весьма различными путями. Принятые мной принципы: распределенная по окружности статора

обмотка с минимально возможным рассеянием магнитных силовых линий, максимально возможная равномерность вращающегося поля в его угловых фазах... оказались единственно правильными. Из многих внезапно появившихся тогда изобретателей многофазных двигателей лишь очень немногие, среди которых не было и Тесла, близко познакомились с существом магнитных полей при переменном токе. Но как раз правильное в теоретическом отношении понимание процессов и явилось причиной тех успехов, которыми сопровождались первые же расчеты двигателей, а следовательно и успехов, которые

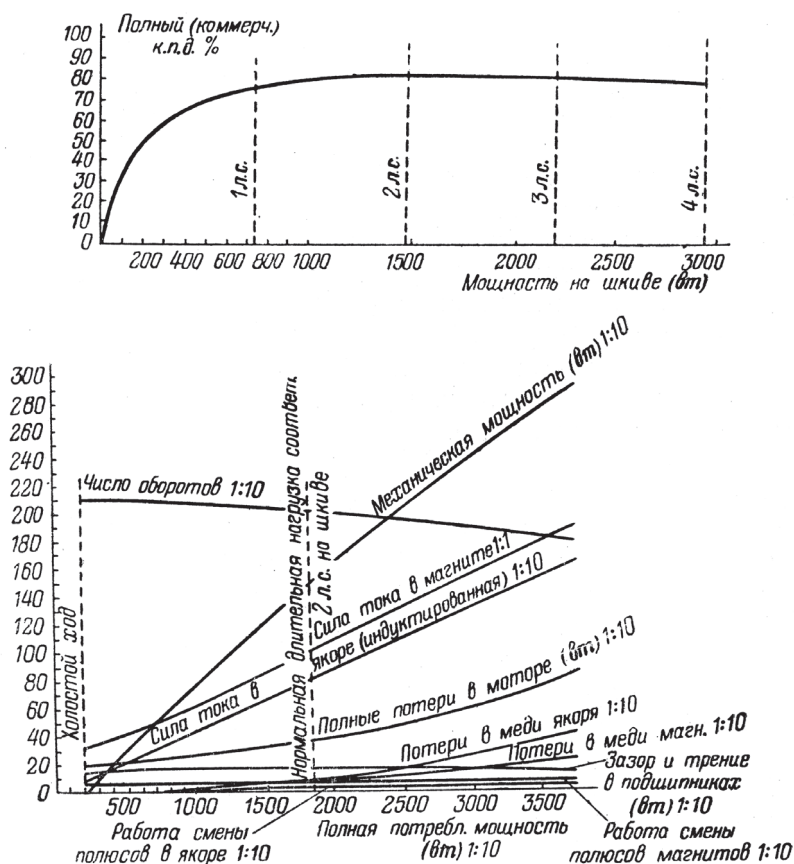


Рис. 3—13. Характеристики асинхронного двигателя с барабанной обмоткой.

выпали на долю многофазных двигателей Всеобщей компании электричества» [Л. 36].

Познакомившись с первыми трехфазными машинами Доливо-Добровольского, мы должны вновь вспомнить о том, что все начальные его работы были подчинены в первую очередь решению проблемы электропередачи. Решающим условием увеличения дальности передачи является повышение напряжения. Трехфазная система не представляла принципиальных затруднений для трансформирования токов. Однако для этой цели нужно было использовать по три трансформатора на каждом конце линии, тогда как для однофазного тока достаточно было лишь двух трансформаторов: повышающего и понижающего¹. Столь существенное усложнение, связанное с увеличением числа довольно дорогих аппаратов, не могло не вызвать отрицательного отношения многих электриков к новой системе. Безусловно, желательным было бы устранить указанное неудобство.

М. О. Доливо-Добровольский заметил, что заторможенный асинхронный двигатель представляет собой не что иное, как многофазный трансформатор. Можно выполнить статор таким образом, что он будет иметь три стержня, замыкающие магнитную цепь, т. е. так, как если бы статор имел три полюса с тремя фазными обмотками. Тогда в центре симметричной магнитной системы возникнет вращающееся магнитное поле, а в замыкающих стержнях поток будет пульсировать. Распределение токов в трехфазной обмотке машины подсказало Доливо-Добровольскому, что в отношении магнитных потоков приложимы те же закономерности, которые действительны и для токов. Таким образом, в магнитной системе с тремя стержнями магнитный поток одной фазы проходит через два стержня других фаз, т. е. так же, как и для токов, можно записать: $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$. Именно эта аналогия навела Доливо-Добровольского на мысль разместить вторичные обмотки не на вращающемся якоре, как в маши-

¹ Известно, что в сетях высокого напряжения и большой мощности до сих пор применяются трехфазные трансформаторные группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов каждая.

не, а на стержнях, замыкающих магнитную систему. Тогда пульсирующий в каждом стержне магнитный поток наводит э. д. с. в каждой катушке строго определенной фазы, и все вторичные катушки дают опять трехфазную систему токов, но другого напряжения, величина которого зависит от коэффициента трансформации.

В 1889 г. М.О.Доливо-Добровольский сделал патентные заявки на трехфазный трансформатор и получил патенты в Германии (№ 56359), Англии (№ 19555), России (№ 95 за 1893 г.) и других странах. Все патенты в принципиальных частях идентичны и лишь в незначительных деталях отличаются друг от друга. На рис. 3-14 схематически изображены наиболее характерные конструкции трехфазных трансформаторов М.О.Доливо-Добровольского.

Легко заметить, что трансформатор с симметричной магнитной системой, изображенный справа на рис. 3-14,а, имеет внешнее сходство с трехфазной машиной, фазные обмотки которой расположены на радиальных выступах. Здесь лишь устранен ротор и стержни замыкаются непосредственно друг с другом. На этих радиальных стержнях расположены первичные и вторичные обмотки. Летом 1889 г. был построен первый опытный трансформатор с радиальным расположением стержней мощностью примерно 3 квт [Л. 37].

Очень скоро М.О.Доливо-Добровольский пришел к заключению, что магнитную систему трансформатора можно сделать более компактной, если стержни расположить параллельно. Это упрощало и технологию обмотки трансформатора. Замыкать магнитную цепь должны были два одинаковых ярма. На и рис. 3-14,б показаны две проекции трансформатора, оба ярма которого имеют форму треугольника; каждое ярмо трансформатора, изображенного на рис. 3-14,в, имеет кольцеобразную форму и каждое ярмо трансформатора, представленного на рис. 3-14,г, — звездообразную форму.

По аналогии с токами в многофазной системе, которые М.О.Доливо-Добровольский обозначал термином «сопряженные», магнитные потоки в трехфазном трансформаторе он тоже называл «сопряженными». Этот не вполне понятный в то время термин послужил, между прочим, причиной судебного процесса, который возбуди-

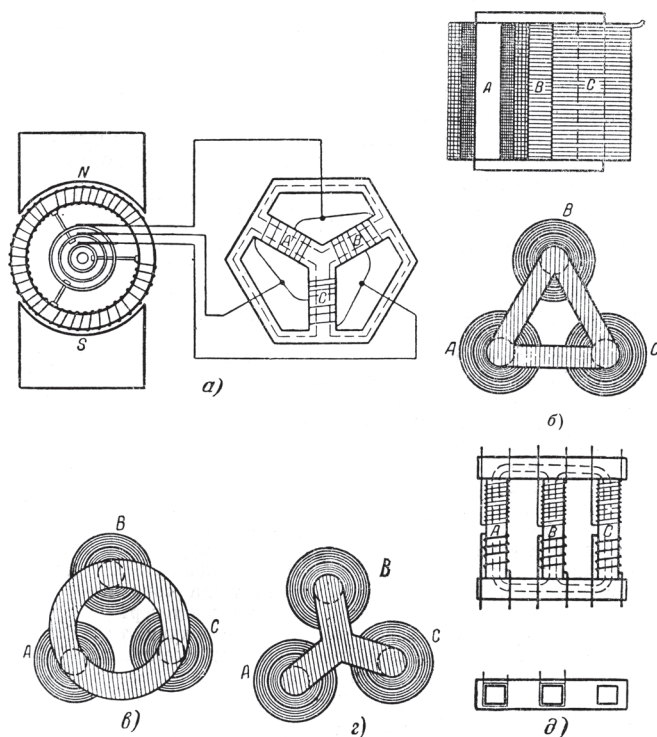


Рис. 3—14. *Трехфазные трансформаторы М.О.Доливо-Добровольского.*

ли некоторые фирмы против АЭГ, владевшей германским патентом Доливо-Добровольского. Дело в том, что в первых патентах, в том числе и в германском, Доливо-Добровольский привел на чертежах только пример трансформатора с радиальным расположением сердечников. Затем он стал изготовлять трансформаторы с параллельным расположением сердечников (их называли тогда «призматическими»), но в дополнительном патенте ему было теперь уже отказано на том основании, что все конструкции трехфазных трансформаторов охватываются термином «магнитное сопряжение». Тем не менее другие фирмы, ссылаясь на то, что на чертеже изображено и в описании упоминается лишь радиальное расположение стержней, приступили к изготовлению трехфазных трансформаторов с параллельным

расположением стержней. Много таких трансформаторов, в частности изготовленных фирмой «Ламейер и К°», было ввезено в Россию, и еще теперь на некоторых старых небольших электростанциях можно найти трансформаторы характерной призматической формы. Позднее неоднократно пытались приписать изобретение трансформаторов этого типа Броуну или фирме Сименс-Гальске.

Однако не может быть никакого сомнения, что изобретение «призматических» трехфазных трансформаторов принадлежит Доливо-Добровольскому, ибо он не только описал их конструкции в русской привилегии, но и послал еще в 1889 г. Швейцарскому патентному ведомству две модели трехфазных трансформаторов: одна из них была радиальной, а другая — призматической¹.

Но все сомнения и споры о приоритете моментально исчезли, как только М.О.Доливо-Добровольский изобрел в 1891 г. трехфазный трансформатор с параллельным расположением стержней в одной плоскости [Л. 37]. В германском патенте № 79608, заявленном 4 октября 1891 г., изобретатель указывал следующее. В трехфазном трансформаторе, не нарушая принципа распределения магнитных потоков, можно сердечники связать таким образом, что оба ярма не имеют замкнутой формы. Можно как бы разрезать радиальный трансформатор, распрямить его внешнее ярмо и удлинить внутреннее ярмо. В результате получится трансформатор, схематический вид которого представлен на рис. 3-14,д.

Таким образом, был создан тот тип трехфазного трансформатора, который в принципе сохранился до настоящего времени. Едва ли следует подчеркивать, что сердечники всех трансформаторов М.О.Доливо-Добровольского набирались из листовой стали («динамного железа»).

Изучая работы М.О.Доливо-Добровольского, которыми были заложены основы техники трехфазного тока, нельзя упустить из виду еще одно важное его изобретение. Речь идет о четырехпро-

¹ По швейцарским законам патентуются только те изобретения, которые могут быть представлены в виде модели.

водной цепи трехфазного тока или, иначе, о системе трехфазного тока с нулевым (нейтральным) проводом. Соответствующий германский патент № 71137 был заявлен 2 апреля 1890 г.

В патентном описании изобретатель указывает, что при распределении постоянного или однофазного токов часто применяется так называемая трехпроводная сеть, которая, увеличивая радиус электрооборудования, обеспечивает, кроме того, экономию в проводниковом материале. Поскольку при более или менее симметричной нагрузке обеих ветвей сети ток в нулевом проводе составляет ничтожную величину или даже равен нулю, то этот провод может быть взят значительно меньшего сечения, чем крайние провода; последние в свою очередь также имеют меньшее сечение в сравнении с двухпроводной линией, так как напряжение между крайними проводами в трехпроводной сети вдвое больше напряжения потребителей, и, следовательно, ток в них меньше. Для трехпроводной сети постоянного тока требуется две машины, а для однофазного тока можно обойтись одной машиной удвоенного напряжения, если нейтральный провод присоединить к средней точке ее обмотки. Известно далее, что Тесла в своей двухфазной системе применял общий обратный провод (рис. 3-15,а), но заметной экономии в проводах здесь не достигалось, так как общий провод должен был рассчитываться на ток, в $\sqrt{2}$ раз больший тока одной фазы. Можно было бы и в этом случае применить систему с нулевыми проводами, если последние присоединять к средним точкам групп катушек, относящихся к одной фазе. Тогда можно было бы удвоить напряжение (как в обычной трехпроводной линии) и фактически иметь в распоряжении два напряжения (между крайними проводами и вдвое меньшее между крайним проводом и нейтралью), но в этом случае, как показано на рис. 3-15,б нужно иметь пять проводов. Если идти таким путем, то для трехфазной системы требовалось бы семь проводов (рис. 3-15,в).

Изобретение Доливо-Добровольского устраняло этот недостаток. Если в последней схеме переключить концы катушек 2–2', т. е. изменить фазу этой катушки на 180° , то вместо прежней разности фаз 60° получается разность фаз 120° . Но тогда получается уже зна-

комая система Доливо-Добровольского с ее замечательным свойством, заключающимся в том, что сумма всех трех токов равна нулю. Здесь концы соответствующих катушек могут быть соединены в одной точке (рис. 3-15,а и 3-15,б), к которой и присоединяется нулевой провод. В этом случае можно пользоваться двумя напряжениями (фазным и линейным) и вместе с тем достигается экономия в проводниковом материале¹.

Четырехпроводная трехфазная цепь обладает тем выгодным свойством, что она позволяет допускать определенную несимметрию нагрузки. Некоторая перегрузка одной фазы по отношению к другим не вызывает существенных изменений в режиме работы этих последних фаз, поскольку избыточный ток $i_0 = i_1 + i_2 + i_3$ возвращается по нейтральному проводу (рис. 3-16).

Здесь следует отметить, что в 80-х–90-х годах прошлого столетия удельный вес осветительной нагрузки был очень велик. Пре-

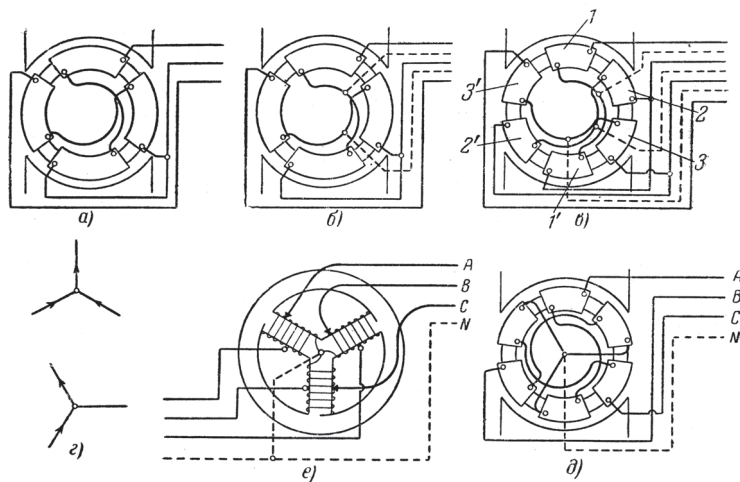


Рис. 3–15. К изобретению трехфазной цепи с нейтральным проводом.

¹ Если вспомнить, что на три провода в трехфазной сети расходуется меди на 25 % меньше, чем в однофазной, то легко сообразить, что даже добавление четвертого (нейтрального) провода, который обычно берется вдвое меньшего сечения, сохраняет еще преимущество на стороне трехфазной сети.

имущественное значение осветительной нагрузки сохранялось еще и в первые годы развития техники трехфазного тока. Отсюда становятся понятными те опасения относительно несимметричной нагрузки, которые неоднократно высказывал М.О.Доливо-Добровольский. В связи с этим он искал возможности регулировать напряжение в отдельных фазах таким образом, чтобы это заметно не сказывалось на других фазах. Как раз четырехпроводная цепь давала возможность решать эту задачу.

Указанные опасения Доливо-Добровольского были настолько велики, что он для регулирования напряжения в отдельных фазах предложил применять изобретенный им трехфазный автотрансформатор. Эта идея иллюстрируется схемой рис. 3-15,е. На металлическом, набранном из отдельных стальных листов каркасе, форма которого совпадает с формой магнитопровода «радиального» трансформатора, размещаются катушки, соединенные друг с другом в нейтральной точке.

Провода от генератора подходят к неподвижным контактам, размещенным на соответствующих катушках, а линейные провода подведены к скользящим контактам, перемещающимся по тем же катушкам. Напряжение в каждой фазе, а следовательно, и линейные напряжения зависят от положения скользящих контактов¹.

В английском патенте на четырехпроводную трехфазную цепь (№ 13260 от 22 августа 1890 г.) М.О.Доливо-Добровольский предло-

¹ В связи с этим следует заметить, что в своей статье «Из истории трехфазного тока», написанной в 1917 г., Доливо-Добровольский допускает ошибку, относя изобретение автотрансформатора к 1892 г. В этой работе он пишет: «Я построил ... в 1892 г. трансформатор с переменным коэффициентом трансформации. Соответствующий государственный патент № 75361 (январь 1893 г.) содержит описание первого автотрансформатора ...» [Л. 37]. В действительности мы видим, что еще в апреле 1890 г. он описал конструкцию и принцип действия автотрансформатора. Вероятно, вспоминая в 1917 г. историю своих изобретений, он недостаточно внимательно просмотрел свой патент на четырехпроводную трехфазную цепь. В патенте № 75361, который он упоминает в вышеприведенной цитате, описан автотрансформаторный пуск асинхронных двигателей. Мы рассмотрим этот патент ниже.

жил для регулирования напряжения в отдельных фазах использовать, кроме автотрансформатора, также трансформатор с переменным коэффициентом трансформации. В этом случае предлагалось изготавливать вторичные обмотки трехфазного (или группы однофазных) трансформатора таким образом, чтобы можно было, осуществляя соответствующие переключения, изменять в некоторых пределах число витков.

На рис. 3-16 представлена схема четырехпроводной трехфазной сети с различными видами нагрузки, где L — лампы, M — электродвигатель, T_1 и T_2 — трансформаторы. Доливо-Добровольский указывает, что включение двигателя в четырехпроводную сеть не предполагает обязательного соединения его нулевой точки с нейтралью сети. Но, с другой стороны, такое соединение следует, по мнению изобретателя, рекомендовать хотя бы уже потому, что в этом случае даже выход из строя двух фаз двигателя не влечет за собой его немедленной остановки.

Наконец, М.О.Доливо-Добровольский указал, что вместо нейтрального провода можно использовать землю. Это указание означало

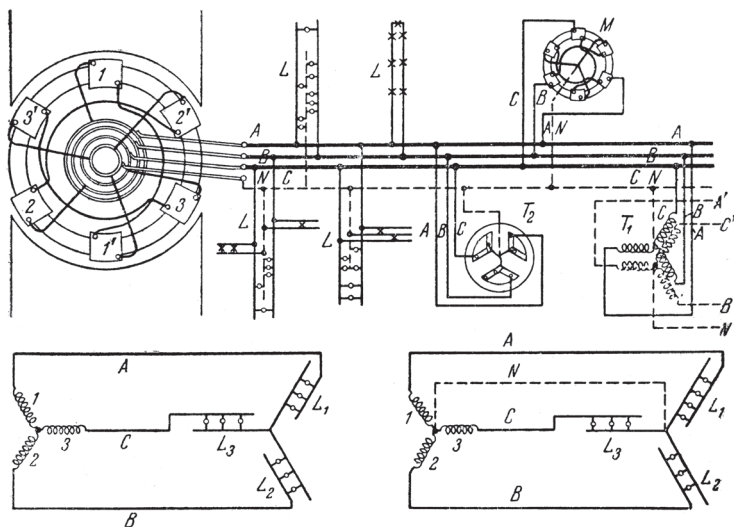


Рис. 3—16. Четырехпроводные трехфазные цепи.

не что иное, как предложение применять в качестве одного из вариантов трехфазных сетей получившую в дальнейшем широкое применение сеть с заземленной нейтралью. Именно этот вариант был принят для первой трехфазной линии передачи Лауфен — Франкфурт.

Изложение истории зарождения техники трехфазного тока было бы неполным, если бы мы ограничились анализом предложений, касающихся лишь различных конструкций и схем. Нам представляется совершенно необходимым, хотя бы очень кратко, проследить формирование теоретических представлений того времени и выяснить роль М.О.Доливо-Добровольского в развитии теории переменного тока вообще и трехфазного тока в частности.

В гл. 1 на ряде примеров была показана борьба сторонников постоянного тока со сторонниками переменного тока. Наряду с действительными недостатками переменного тока (невозможность непосредственного аккумулирования, невозможность применения в ряде электрохимических процессов) ему совершенно необоснованно приписывались такие недостатки, которыми он либо не обладал вовсе, либо их легко можно было ослабить. Особый упор делался на трудности параллельной работы машин переменного тока, потери холостого хода трансформаторов, влияние на линии связи. В теоретических работах выводились сложнейшие формулы, с которыми инженеры и техники предпочитали не иметь дела. Физическая сущность процессов отодвигалась на задний план. Дискуссии часто уклонялись от существа дела. «Слово «самоиндукция» являлось то ангелом-хранителем, то угрожающим призраком. Без основания, главным образом из опасений, самоиндукцию и сдвиг фаз делали ответственными за все неудачи» [Л. 37].

Борьба сторонников переменного тока была затруднена в немалой степени также и потому, что им приходилось выступать против таких авторитетных ученых и изобретателей, какими были М.Депре, Д.А.Лачинов, Т.А.Эдисон и др. С другой стороны, разгоревшаяся ожесточенная конкурентная борьба отдельных фирм приводила порой не только к ошибочным, но и вредным, задерживавшим прогресс, действиям. Так, в 1889 г. по требованию фирмы АЭГ был снят с по-

вестки дня заседания Электротехнического общества большой доклад М.О.Доливо-Добровольского о передаче электроэнергии переменным током. Ниже мы еще вернемся к этому факту¹.

Позднее М.О.Доливо-Добровольский следующим образом оценивал обстановку, создавшуюся в 80-х годах «...я был с самого начала дела и пришел к убеждению, что партия постоянного тока отнюдь не всегда боролась объективно. Отсутствие хороших двигателей переменного тока, невозможности аккумулирования были в то время известными большими недостатками переменного тока; но часто боролись против переменного тока также там, где эти факторы играли лишь незначительную роль. Там было больше фанатизма, чем технического убеждения...» [Л. 36].

Определенные успехи в начальном развитии теории переменного тока были достигнуты в трудах английских электротехников и прежде всего в трудах известного в то время ученого, впоследствии профессора Бирмингемского университета Гисберта Каппа. В 1887 г. он опубликовал работу, в которой была сделана успешная попытка разработать начала теории трансформатора [Л. 126]. Уже в этой ранней работе проявился излюбленный метод Каппа — метод упрощения решаемой задачи путем пренебрежения несущественными факторами. В этой же работе Капп вывел точную формулу, основы которой были заложены еще в 1835 г. Б.С.Якоби, а значение которой без пояснений очевидно и хорошо известно каждому электрику: формулу для определения среднего арифметического значения Э. Д. С.:

$$E_{cp} = 4\omega f\Phi,$$

где ω — число последовательно соединенных витков обмотки сосредоточенного типа;

f — частота;

Φ — основной магнитный поток.

¹ См. гл. 8.

М. О. Доливо-Добровольский, который в то время был согласно его собственному замечанию «ревностным читателем английских технических журналов» [Л. 37], с восторгом воспринял выводы Каппа и, как мы увидим ниже, сам впоследствии сделал существенный вклад в развитие теории переменного тока и, в частности, теории трансформатора.

Выше мы уже имели возможность убедиться в правильности и высоком уровне теоретических представлений Доливо-Добровольского. Теоретический анализ позволил ему установить наличие пульсаций в кривой н. с. многофазных машин, правильное соотношение токов и напряжений в трехфазной системе и потоков в трехфазном трансформаторе. Изучение обмоток трехфазной машины и характера протекающих в них токов привело Доливо-Добровольского к разработке схемы разрезной обмотки и улучшению использования машины. В принципе работы асинхронной машины он усмотрел аналогию с принципом работы трансформатора и на этом основании выяснил физику процесса в асинхронном двигателе.

Значительным событием в развитии теории переменного тока явилось выступление М.О.Доливо-Добровольского 9 сентября 1891 г. на Франкфуртском международном конгрессе электротехников. В работах этого конгресса, проходившего в период 7–12 сентября, принимало участие 700 делегатов, в том числе 240 иностранных. Доливо-Добровольский участвовал главным образом в работе секции техники сильных токов, в которой председательствовали проф. ФЕРРАРИС и проф. КОЛЬРАУШ.

В своем докладе на тему «Передача электроэнергии посредством переменного тока» [Л. 7] М.О.Доливо-Добровольский изложил развитие и четко сформулированные им основные положения теории переменного тока. В этом докладе он выдвигает на первый план анализ физических процессов в цепях переменного тока и излагает то, что он называет «практической теорией переменного тока». Приведем в кратком изложении содержание этого крайне интересного труда.

Если в поле переменного магнитного потока помещена катушка, то индуцированная в ней э. д. с. может быть выражена приведен-

ной выше формулой Каппа. Но если в этой формуле ω и f заданы, то $E = c\Phi$, где c — постоянный коэффициент.

По этому поводу Доливо-Добровольский говорит: « E является мерой для Φ или наоборот, т. е. если предположить, что частота задана, то в данном аппарате магнетизм (магнитный лоток — О. В.) и напряжение отличаются друг от друга постоянным коэффициентом. Электродвижущая сила катушки при этом непременно та же самая независимо от того, создается ли магнетизм током, протекающим в самой катушке, или он исходит частично или полностью от другого источника. В этом смысле не имеется вообще никакой разницы между индукцией и самоиндукцией». Для того чтобы перейти от э. д. с. к напряжению, следует учесть падение напряжения в катушке, которое в машинах и трансформаторах обычно невелико.

Рассмотренное выше положение М. О. Доливо-Добровольский называет первым и важнейшим положением теории переменного тока. Известный современник Доливо-Добровольского Дюбуа-Реймон следующим образом подчеркнул важность этого первого сформулированного положения: «Доливо-Добровольский сам несколько дней назад разъяснил нам в форме, дающей очень много нового, соотношения между напряжением на зажимах катушки, возбуждаемой переменным током, и числом силовых линий, охватывающих ту же самую катушку. Он показал, что между этими обеими величинами при определенной частоте всегда существует простая пропорциональность, совершенно независимо от того, является ли напряжение на зажимах функцией внешнего влияния или переменной интенсивности самого поля, и совершенно независимо от того, является ли число силовых линий или переменная интенсивность поля функцией внешнего влияния или имеющихся в катушке ампервитков» [Л. 127].

Развивая дальше свое первое положение, Доливо-Добровольский рассматривает катушку, включенную на напряжение переменного тока: «Если катушка включена на напряжение переменного тока, то ее переменный магнетизм всегда таков, что он соответствует этому напряжению, или, как я говорю, напряжение поддерживает

равновесие. Если к катушке не подводится посторонних силовых линий, то в ней при включении под напряжение возникает такой ток, что он тотчас создает необходимый магнетизм. Если сопротивление магнитной цепи аппарата мало, то достаточно небольшого тока, если же это сопротивление больше, то возрастает также и ток; но во всех случаях магнетизм один и тот же (я повторяю — до небольшой поправки на падение напряжения). Если же к катушке подводятся посторонние силовые линии, то току нет необходимости возрастать до прежнего значения, он мог бы быть равен нулю или даже изменить направление. Если от посторонних силовых линий вернуться к нормальному состоянию, то для поддержания прежнего магнетизма нужно увеличить ток, как это происходит, например, в трансформаторах».

Нетрудно видеть, что в этих рассуждениях Доливо-Добровольский приближается к описанию физики процесса в трансформаторе. И действительно, первой теоретической работой Доливо-Добровольского, которая появилась вслед за рассматриваемой, явилось исследование трансформатора.

Проследим дальнейшее развитие доклада.

Если магнитный поток изменяется синусоидально, то и напряжение на зажимах катушки будет синусоидальным (рис. 3-17). Равным образом справедливо и обратное положение. Наведенная потоком э. д. с. отстает от него по фазе на 90° , поскольку «э. д. с. является функцией скорости, с которой изменяется магнетизм». Таким образом,

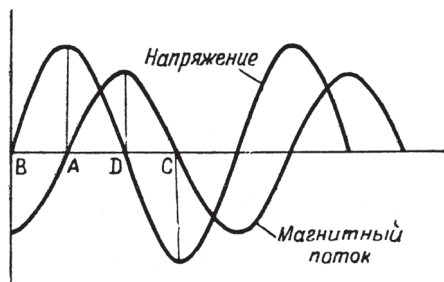


Рис. 3—17. Кривые напряжения и потока.

«напряжение и магнетизм не только количественно, но и качественно (по форме кривой), и по времени (по фазе) прочно связаны друг с другом. Это следующее важное научное положение».

Далее Доливо-Добровольский делает из изложенного выше важные выводы и приходит к новым определениям.

Если нет потерь мощности в обмотке на нагревание и никаких прочих побочных явлений, то ток по своей фазе должен отставать от подведенного к катушке напряжения на 90° , поскольку ток должен совпадать по времени с вызванным им потоком. Доливо-Добровольский говорит: «Этот сдвинутый на 90° против напряжения ток не представляет собой тока, совершающего работу, а вызывает только колебание энергии, так как половину времени он направлен согласно с напряжением, как в генераторе, а в другую половину времени — против напряжения. Этот безваттный ток, поскольку он потребляется исключительно на намагничивание, должен быть назван «возбудительным током» (Erregungsstrom).

Если же предположить, что энергия не затрачивается на создание магнитного потока, а идет только на нагревание обмотки рассматриваемой катушки, то в этом случае ток совпадает по фазе с напряжением, и Доливо-Добровольский предлагает назвать его «ваттным током».

«В действительности, — говорит Доливо-Добровольский, — ни возбудительный, ни ваттный токи в отдельности невозможны, ибо нет таких аппаратов, которые обтекаются током и не потребляют ватт, и нет таких токов, которые не сопровождалось бы магнитным полем. Можно приблизиться к экстремуму, но достичь его никогда нельзя.

Можно любой переменный ток рассматривать как комбинацию, как результирующий ток из возбудительного и ваттного токов. Эти два тока взаимно сдвинуты в своих фазах на 90° и дают результирующий ток какой-либо средней фазы. Просто доказать, что оба тока складываются как две перпендикулярные друг к другу силы».

Вслед за этим Доливо-Добровольский показывает так хорошо теперь известное даже начинающему электротехнику правило сложения активного (ваттного) и реактивного (возбудительного, или

безваттного) токов или, наоборот, правило разложения любого тока на две составляющие (см. рис. 3-18, который, так же как и рис. 3-17, взят из доклада Доливо-Добровольского).

Может показаться странным, что электрики, уже имевшие дело с переменным током в 80-х годах, не использовали до 1891 г. этот важнейший метод исследования цепи переменного тока. Однако так именно и было. Как раз из-за того, что электротехники не имели еще достаточно четкого представления о многих простейших закономерностях и свойствах переменного тока, они, по выражению Доливо-Добровольского, часто впадали в суеверие и мистицизм, как только заговаривали о переменном токе.

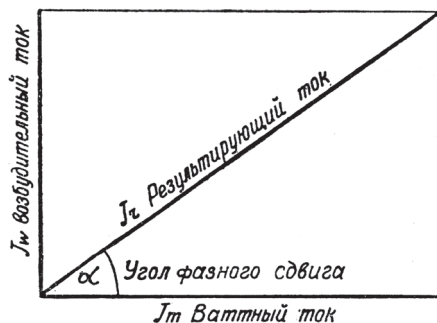


Рис. 3—18. Параллелограмм токов.

Доливо-Добровольский позже не раз указывал на свое авторство в отношении введения понятий «ваттной» или «рабочей» и «безваттной» составляющих тока. Так, например, выступая на Первом Всероссийском электротехническом съезде в начале 1900 г. Доливо-Добровольский говорил: «Еще в 1891 г. на Международном электротехническом конгрессе я показал преимущества метода представления каждого переменного тока как разложенного на две слагаемые таким образом, что «рабочая» совпадает в фазе с напряжением, а «безваттная» или «ленивая» слагаемая сдвинута относительно ее на 90° » [Л. 29]. Кроме того, авторство Доливо-Добровольского подтверждается и рядом указаний его современников, например,

в статье Рёсслера [Л. 128] или в сообщении Блонделя на Международном конгрессе электротехников в Женеве [Л. 129].

Доливо-Добровольский в своем докладе показал на конкретном примере, насколько упрощается расчет электрических аппаратов (например, трансформаторов), если основываться на сформулированных им основных положениях теории переменного тока. Ниже мы рассмотрим подробнее его теорию трансформаторов.

Интересно отметить, что Доливо-Добровольский распространяет правило параллелограмма и на случай емкостной нагрузки.

Далее Доливо-Добровольский критикует ложные представления некоторых электротехников об условиях параллельной работы машин переменного тока. Чем меньше сопротивление обмотки якоря, по утверждению Доливо-Добровольского, тем больше «синхронизирующая сила» и тем лучше условия параллельной работы машин. В этом же докладе Доливо-Добровольский вновь указал на аналогию асинхронного двигателя с трансформатором и четко сформулировал свои принципы конструирования асинхронных машин.

В отношении частоты переменного тока Доливо-Добровольский высказывался за 30–40 *гц*, тогда как в Америке еще не отказались от частот 125 и 133 *гц*.

В заключительном слове Доливо-Добровольский настоятельно рекомендовал принять *синусоидальную* форму кривой тока. Он утверждал, что такая форма кривой менее любой другой подвержена искажениям в различных электрических аппаратах и машинах.

Позднее Доливо-Добровольский еще раз вернулся к вопросу о форме кривой переменного тока и, основываясь на собранном опытным материале, еще раз подтвердил свой прежний вывод: «Форма кривой должна для общей практики возможно ближе подходить к синусоиде». Это подтверждение он высказал в упомянутом уже докладе на Первом Всероссийском электротехническом съезде. Следует отметить, что на этот раз Доливо-Добровольский, рекомендуя синусоидальную форму кривой, говорит уже о вредном влиянии высших гармонических в случае кривой,

отличающейся от синусоиды. Так, он приводит пример из своей практики: «При высоких напряжениях, когда в цепи есть электростатическая емкость (кабели), может легко случиться, что при несинусоидальной кривой явления так называемого резонанса смогут остановить правильный ход всей станции. Подобное явление, которое мне пришлось раз наблюдать и «приводить в порядок», случилось на одной большой станции: резонанс «высших гармонических членов» увеличивал силу тока в кабелях примерно втрое при неизменном напряжении, как только включали один или два из многих выходящих со станции кабелей (фидеров). Это явление наступало лишь тогда, когда ток развивали с помощью динамомашин, поставленных одной иностранной фирмой ... Причиной было именно то, что вышеозначенные машины развивали ток плоской формы, причем слагающая тройной периодичности была сильно развита...» [Л. 29].

Основные положения теории переменного тока, сформулированные Доливо-Добровольским на Франкфуртском конгрессе, были очень быстро восприняты электротехниками. Рассуждения Доливо-Добровольского были перенесены в многочисленные статьи, учебники и монографии и полностью сохранили свое значение до настоящего времени, однако имя автора этих мыслей постепенно было забыто. Термины «ваттный» или «рабочий» и «безваттный» или «возбудительный», или «ленивый», введенные в науку Доливо-Добровольским, были впоследствии заменены терминами «активный» и «реактивный».

Во всяком случае несомненным является то, что вклад М.О.Доливо-Добровольского в развитие основ теории переменного тока имеет не меньшее значение, чем исследования трансформаторов, выполненные Каппом и Феррарисом, чем выдающиеся, но, правда, более поздние, обобщения Штейнметца с его замечательным символическим методом решения электротехнических задач¹.

¹ Книга Штейнметца «*Theory and calculation of alternating current phenomena*» вышла первым изданием в 1897 г.

Знакомство только с рассмотренной теоретической работой показывает, насколько неправильно сложившееся у некоторых современных специалистов представление о том, что Доливо-Добровольский был только выдающимся инженером-практиком. Это и другие его теоретические исследования убедительно показывают, что в его лице электротехника имела замечательного деятеля инженерной практики, наделенного высокоразвитой физической интуицией и вместе с тем талантливого ученого, опиравшегося в своих исследованиях на прочную научно-теоретическую базу.

Итак, оглянемся на пройденный путь. Мы видели, что в период 1888–1891 гг. М.О.Доливо-Добровольский построил трехфазные однопольные преобразователи и синхронные генераторы, трехфазные трансформаторы и асинхронные двигатели с короткозамкнутыми и фазными роторами, исследовал трехпроводные и четырехпроводные цепи трехфазного тока и в заключение разработал основные положения теории переменного тока. Несомненно, эти работы не были механической цепью разрозненных изобретений и открытий. Это была вновь созданная новая комплексная область электротехники. Также несомненно и то, что все это ни в коей мере не являлось плодом случайного вдохновения талантливого изобретателя. Его достижения представляли собой результат кропотливой, напряженной, ежедневной работы, в процессе которой Доливо-Добровольский, отвечая задачам практики, шел от одной схемы к другой, от порой неудовлетворительных первых конструкций к совершенным образцам, дожившим до наших дней.

Немного было в истории техники таких изобретателей, которые подобно Доливо-Добровольскому разработали бы *все* основные элементы новой комплексной системы и довели ее до практического исполнения и внедрения в промышленность, да притом в чрезвычайно короткие сроки.

Объективные условия для творчества М.О.Доливо-Добровольского складывались исключительно благоприятным образом. Его труды отвечали основным требованиям эпохи. Он начал свою инженерную и научную деятельность в тот период, когда развивавшиеся

производительные силы общества ставили перед новой областью техники — электротехникой — все новые и новые, все более и более ответственные задачи. Основное направление работ Доливо-Добровольского совпало с главным направлением в развитии электротехники. Кроме того, нельзя упускать из виду, что он работал в условиях наиболее развитой в то время германской электротехнической промышленности и, являясь одним из технических руководителей крупнейшей фирмы, располагал большими возможностями для экспериментального исследования и практической реализации своих изобретений, особенно после того, как фирма поверила в его успех.

Когда был завершен первый и наиболее плодотворный этап работ М.О.Доливо-Добровольского, когда он сам был глубоко убежден в великом будущем техники трехфазного тока, нужно было еще убедить в этом и весь электротехнический мир. Как нельзя более кстати оказалась Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне, которая должна была открыться летом 1891 г.

Перед М.О.Доливо-Добровольским встали новые задачи. Начинаясь работа по подготовке к строительству электропередачи Лауфен — Франкфурт. Предстояло совершить большой и трудный подъем на вершину, с которой должен был открыться бескрайний горизонт развития электрификации.

«...БЕССПОРНЫМ ОСТАЕТСЯ ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРИОРИТЕТ
ТОГО ИЗОБРЕТАТЕЛЯ ИЛИ ФИРМЫ, КОТОРЫЕ СУМЕЛИ
СДЕЛАТЬ СВОЕ ОТКРЫТИЕ ЖИЗНЕСПОСОБНЫМ
И НА ОСНОВАНИИ СВОЕЙ ИДЕИ И ОПЫТА СОЗДАТЬ
ПРИМЕНИМЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ АГРЕГАТ».

М.О.Доливо-Добровольский

ГЛАВА IV

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА

ЛАУФЕН – ФРАНКФУРТ

*Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне.
Подготовка к строительству электропередачи. Предварительный опыт.
Сооружения и оборудование электропередачи. Испытания и особенности
работы линии электропередачи*

В 1891 г. был осуществлен грандиозный эксперимент, открывший новую эпоху в развитии электротехники и электроэнергетики. В этом году весь электротехнический мир познакомился с новой системой электрических токов и с теми возможностями, которые предоставлялись человечеству техникой трехфазного тока.

Краткая история подготовки и осуществления электропередачи Лауфен – Франкфурт такова.

В конце 80-х годов встал вопрос о сооружении центральной электростанции в городе Франкфурт-на-Майне. Различные германские и иностранные фирмы предлагали городским властям многие варианты проектов, предусматривающих применение либо постоянного, либо переменного тока. Это было время, когда вопрос: «посто-

янный или переменный ток?» был наиболее острым, когда эта фраза, набранная жирным шрифтом, смотрела на читателей со страниц всех электротехнических изданий. Обербургомистр Франкфурта находился в явно затруднительном положении: он не мог сделать выбора там, где это представлялось неразрешимой задачей даже многим специалистам. Так авторитетная комиссия, созданная для той же цели, в составе ФЕРРАРИСА, КИТTLЕРА, УППЕНБОРНА, ЛИНДЛЕЯ и цюрихского профессора ВЕБЕРА, не пришла к соглашению и не могла дать обербургомистру определенной рекомендации.

Для убедительного решения этого вопроса нашли целесообразным устроить в 1891 г. во Франкфурте давно планировавшуюся международную электротехническую выставку. Любая фирма могла бы продемонстрировать на этой выставке свою систему и успехи. Заранее было обусловлено, что никакие награды экспонентам выдаваться не будут, но зато каждый экспонент будет иметь возможность подвергнуть свои экспонаты тщательной экспертизе. Для проведения испытаний была создана международная испытательная комиссия, состоявшая из наиболее авторитетных ученых и инженеров разных стран. Возглавил работу комиссии маститый немецкий ученый Герман Гельмгольц. Предполагалось, что результаты работы испытательной комиссии дадут ответ на вопрос о выборе рода тока.

В самом начале 1890 г. был образован выставочный комитет под председательством Леопольда Зоннемана. Однако очень быстро выяснилось, что для организации выставки необходимо ввести в состав комитета лицо, способное обеспечить наряду с грамотным техническим руководством абсолютную беспристрастность в отношении отдельных фирм. Выбор пал на талантливого немецкого инженера Оскара фон-Миллера, неутомимым заботам и неиссякаемой энергии которого в значительной степени была обязана Франкфуртская выставка своими масштабами.

Незадолго до этого Миллер вышел из руководства фирмы АЭГ с тем, чтобы вернуться к гражданской инженерной деятельности в свой родной Мюнхен. Выбор Миллера в качестве технического руководителя Франкфуртской выставки был исключительно удачным:



Оскар фон-Миллер (1855–1934).

используя свою большую инженерную эрудицию, а также опыт Мюнхенской электротехнической выставки 1882 г., где он тоже был техническим руководителем, Миллер в значительной степени способствовал успеху новой выставки. Он очень ясно представлял себе те трудности, с которыми сталкивались инженеры 80-х годов, и умел видеть перспективы развития электротехники.

В конце прошлого века устраивались многие общие и специализированные отраслевые, в том числе электротехнические, выставки [Л. 130]. Первая всемирная выставка состоялась в 1851 г. в Лондоне. И уже на этой выставке демонстрировались многие электрические устройства. С тех пор международные, всемирные и национальные выставки стали местом демонстрации важнейших открытий и изобретений в любой области техники и в интересующей нас электротехнике. Читатель помнит, что на Венской международной выставке 1873 г. Ипполит Фонтен демонстрировал обратимость электрических машин и осуществил первый, еще очень скромный по масштабам и результатам опыт передачи электроэнергии на расстояние. На первой Международной электрической выставке, организован-

ной в 1881 г. в Париже, была произведена оценка существовавших систем электрического освещения, и всеобщее внимание было приковано тогда к лампам накаливания, экспонировавшимся компанией Эдисона. В 1882 г. на Мюнхенской международной выставке по предложению ее технического руководителя О. Миллера Марсель Депре осуществил передачу электроэнергии постоянным током на расстояние 57 км. Теперь наступила очередь Франкфуртской выставки, которая должна была наконец-то дать ответ на вопрос: постоянный или переменный ток?

5 марта 1890 г. Миллер был приглашен высказать выставочному комитету свои предварительные соображения относительно предстоящей выставки, а на следующем заседании 12 марта он был избран заместителем председателя. Миллер начал свою деятельность в выставочном комитете с того, что предложил полностью пересмотреть план организации выставки. В своем выступлении на многолюдном расширенном собрании комитета (28 апреля) он говорил: «Прежние электрические выставки в Мюнхене и Вене (Миллер имеет в виду Венскую электрическую выставку 1883 г. *О. В.*) имели целью привлечь симпатии к электрическому освещению... Задачей Франкфуртской выставки должна стать демонстрация передачи и распределения электрической энергии в различных системах и применениях ...» [Л. 131].

Таким образом, Миллер сразу же начал смелый приступ и пошел по пути решения главной энергетической проблемы того времени — проблемы электропередачи. «... Я придавал особенную важность, — писал он, — тем опытам, которые могли бы выяснить, что не только отдельные кварталы, более или менее обширные города, но и целые местности могут быть снабжаемы электрической энергией, развиваемой при помощи водопада и других даровых сил» [Л. 132].

Очень быстро было достигнуто соглашение о передаче электроэнергии во Франкфурт из Пальменгартена, удаленного от выставки на 3,5 км. Фирмы Гелиос, Шуккерт, Сименс-Гальске и электротехническая фирма в Аахене взялись продемонстрировать свои системы передачи постоянным и переменным токами. Франкфуртская фирма

Ламейера предложила построить и испытать линии передачи энергии однофазным и трехфазным (системы Хазельвандера) токами. Эта фирма избрала для генераторных станций город Оффенбах, удаленный от выставки на 10 км. Все эти линии и были построены к открытию выставки [Л. 133].

Однако Миллера эти слишком скромные по масштабам экспериментальные линии электропередачи не вполне удовлетворяли. Его воображение рисовало более грандиозные проекты, его желанием было провести эпохальный опыт. Миллер настойчиво искал и оценивал различные варианты и, наконец, решение было принято...

Незадолго до приглашения О. Миллера для технического руководства Франкфуртской выставкой ему было поручено построить центральную электростанцию постоянного тока мощностью несколько более 200 *квт* в местечке Лауфен для электроснабжения города Хейльбронна. Расстояние между Лауфеном и Хейльбронном составляло около 12 км. И вот Миллер принял чрезвычайно смелое решение: передавать в период выставки электроэнергию из Лауфена не в Хейльбронн, а во Франкфурт-на-Майне. Смелость и неожиданность такого предложения легко понять, если принять во внимание, что Лауфен удален от Франкфурта не на 3,5 км, как Пальменгартен, не на 10 км, как Оффенбах, и даже не на 57 км, как Мисбах удален от Мюнхена и Крейль от Парижа (опыты Депре). Расстояние между Лауфеном и Франкфуртом составляло 170 км! Излишне подчеркивать, что о передаче энергии на такие расстояния могли в то время только мечтать, да и мечты эти, впрочем, считались фантастическими.

Миллер много размышлял о способах передачи энергии из Лауфена и не сомневался он только в одном: электропередача должна быть осуществлена на переменном токе. Вот почему он вспомнил о работах своего недавнего сотрудника, молодого шеф-электрика крупной берлинской фирмы М.О.Доливо-Добровольского. Миллер от имени выставочного комитета сделал фирме АЭГ и швейцарской фирме Эрликон, работавшей по лицензии первой фирмы, официальное предложение передать энергию из Лауфена во Франкфурт.

Нужно представить себе, насколько невероятным и, главное, рискованным должно было представляться названным фирмам согласие принять это предложение. Но Доливо-Добровольский был настолько уверен в своей системе и возможностях переменного тока, что убедил директора Ратенау согласиться на эксперимент. 4 июля 1890 г. фирма АЭГ направила Правлению выставки официальное письмо, где, между прочим, говорилось: «...Мы согласны совместно с электромашиностроительным заводом «Эрликон» передать гидравлическую энергию из города Лауфен-на-Неккаре во Франкфурт на расстояние около 175 км мощностью 300 л. с. ... в предположении, что необходимые линейные провода диаметром 5 мм будут предоставлены в наше распоряжение бесплатно... Только благодаря примеру столь больших размеров можно представить властям и заинтересованным лицам неопровержимое доказательство того, что снабжение энергией больших областей или целой провинции может происходить от одной центральной станции. Что исполнение этого замысла имело бы решающее значение для развития общей промышленности, не требует особого объяснения...» [Л. 134].

Немедленно дал свое принципиальное согласие и директор фирмы Эрликон полковник Губер, которого с Ратенау связывала давняя дружба: они оба окончили одно и то же учебное заведение — политехникум в Цюрихе. Приходится отдать должное руководителям фирм АЭГ и Эрликон, которые согласно замечанию Миллера «имели мужество связать с репутацией своих фирм предприятие, полное непредвидимых затруднений, но имеющее громадное значение для будущности электротехники» [Л. 132]. Очень энергично взялся за работу по подготовке к Франкфуртской выставке и главный инженер фирмы Эрликон Чарльз Броун, который, правда, считал, что было бы лучше построить линию однофазного тока напряжением 30 кв. Тем не менее он с энтузиазмом проектировал трехфазные машины и некоторые другие элементы. Выше мы уже отмечали ту противоречивую роль, которую в развитии техники трехфазного тока сыграл Броун позднее.

Как, собственно, и следовало ожидать, электротехнический мир в связи с публикацией первых сообщений о проекте электропере-

дачи Лауфен — Франкфурт раскололся на два лагеря. Одни восторженно приветствовали это смелое решение, другие отнеслись к нему как к шумной, но беспочвенной фирменной рекламе. Уже 18 июля Франкфуртская газета «Finanzherold» обрушилась на «недостойный маневр» фирмы АЭГ и вслед за этим в одном из следующих номеров поместила письмо якобы компетентного электротехника, подписавшегося буквой Р. Этот бойкий автор сообщал о своих экспериментах с напряжением до 20 000 в, в результате которых он пришел к выводу, что «токи, имеющие напряжение свыше 15 000 в, могут передаваться только с большими потерями; с одной стороны, это вызывается переходом тока от одного провода к другому через изоляторы, с другой стороны, — непосредственной разрядкой тока через воздух. Эти потери весьма значительны, главным образом, при сырой погоде... Я совершенно уверен в непригодности этой системы» [Л. 135]. Такое резко отрицательное отношение к передаче Лауфен — Франкфурт будет более понятно, если принять во внимание, что упомянутая газета являлась рупором некоторых кругов, заинтересованных в системе сжатого воздуха и еще в 1890 г. считавших, что будущее передачи энергии принадлежит этой системе.

Но и более объективные электротехники не верили в успех передачи. Так, немецкий специалист по высоким (для того времени) напряжениям Август Шнеллер, имевший дело с напряжениями до 20–24 кв, попытался экстраполировать результаты своих наблюдений и представить себе работу линии при напряжении 30 кв. Проведя соответствующие расчеты, он доказывал, что около 50 % энергии будет потеряно только в 7 тыс. изоляторов (он не знал еще, что линия будет трехфазной и число изоляторов будет не 7 тыс., а более 9,5 тыс.). Вот его окончательный вывод: «к. п. д. первичной и вторичной машины — по 0,95, трансформаторов при полной нагрузке — 0,98; если принять во внимание еще потери в проводах, которые составят 6,1 %, потери в изоляторах — 3,2 %, емкостные потери на изоляторах — 1000 000 *вт* (!), потери на тихий разряд в параллельных проводах на 175 км — 26 000 *вт*, то при сухой погоде, имея в Лауфене 300 л. с., во Франкфурте получают только около 37 л. с.» [Л. 136].

Шнеллер считал эту затею бессмысленной и рассматривал ее только как шумную рекламу¹.

Действительно, было над чем задуматься современникам Франкфуртской выставки! Идею Миллера объявили утопией, подсчитывали к. п. д., причем у одних он получался 12 % (у Шнеллера), у других 5 % и во всяком случае максимальным считали к. п. д. в 15 % [Л. 138]. Сомнение в экономичности трансформации токов высказал знаменитый Депре [Л. 139]. Даже наиболее осведомленные о работах Доливо-Добровольского лица выражали опасения, что к. п. д. передачи может оказаться ниже 50 %, и одно время думали, что эксперты выставки не будут допущены к испытанию установки. Ситуация была такова, что Миллер готов был отказаться от исполнения своего замысла. Только абсолютная убежденность Доливо-Добровольского и безграничный оптимизм Губера спасли положение. Спустя 20 лет Миллер писал Губеру: «Я никогда не забуду, сколь дальновидной и самоотверженной была Ваша поддержка важной электропередачи во Франкфурте как раз в тот момент, когда запланированное предприятие казалось почти потерянным» [Л. 140].

Между тем, в то время, когда журналы и газеты занимались подсчетами к. п. д., фирмы АЭГ и Эрликон развивали энергичную деятельность. 6 декабря 1890 г. в Мюнхене собралась конференция, на которой встретились уполномоченные правления выставки, двух названных фирм, а также Вюртембергского завода портландского цемента, присутствие которых объяснялось тем, что этому заводу принадлежала гидросиловая установка мощностью 1500 л. с. на реке Неккар в Лауфене. Одну турбину мощностью 300 л. с. завод предоставил для Франкфуртской выставки. На конференции в Мюнхене в общих чертах была достигнута договоренность о распределении между фирмами заказов на изготовление оборудования. Однако главным итогом конференции было решение провести предварительные испытания высокого напряжения.

¹ С резкой критикой статьи Шнеллера выступил в журнале «The Electrical Engineer» известный ученый Ч.П.Штейнметц [Л. 151].

Это решение было вполне естественным и, безусловно, правильным. В промышленности еще никогда до этого не имели дела с напряжениями выше 10 000 в. Предполагалось, что передача энергии из Лауфена во Франкфурт будет осуществляться при напряжении примерно 25 000 в. Однако едва ли было бы разумным совершить столь значительный скачок без предварительного эксперимента. Особенно важно было выяснить прочность изоляции, влияние сырой погоды и влияние электропередачи на линии связи. Проведение предварительного эксперимента было поручено фирме Эрликон.

Поскольку трехфазные машины и трансформаторы еще не были изготовлены, предварительные испытания было решено провести на однофазном токе. Во дворе завода в Эрликоне была натянута в несколько рядов двухпроводная линия длиной 3 км и установлены машины, трансформаторы и приборы. 24 января 1891 г. в присутствии представителей фирм, выставки, правительств германских земель, по территории которых должна была пройти линия передачи Лауфен — Франкфурт, государственного управления почт, управления телеграфа и др. был проведен предварительный опыт. От АЭГ в проведении опыта, схема которого приведена на рис. 4-1, участвовал М.О.Доливо-Добровольский¹.

Напряжение в опытной установке менялось путем изменения скорости генератора. Были проведены опыты при напряжениях до 15 кв, до 20 кв, до 30 кв и, наконец, до 33 кв. При испытаниях определяли расстояния между проводами, при которых происходил разряд, производили короткие замыкания и проверяли действие защиты, имитировали дождь, создавали самые наихудшие условия, испытывали различные конструкции фарфоровых изоляторов, исследовали влияние линии сильного тока на телефонную линию. Все испытания дали положительный результат. Правление выставки и правительственные учреждения убедились в возможности передачи высокого напряжения.

¹ Э. Р а т е н а для большей уверенности в возможности применения очень высоких напряжений поручил Доливо-Добровольскому лично провести «негласные» опыты [Л. 37].

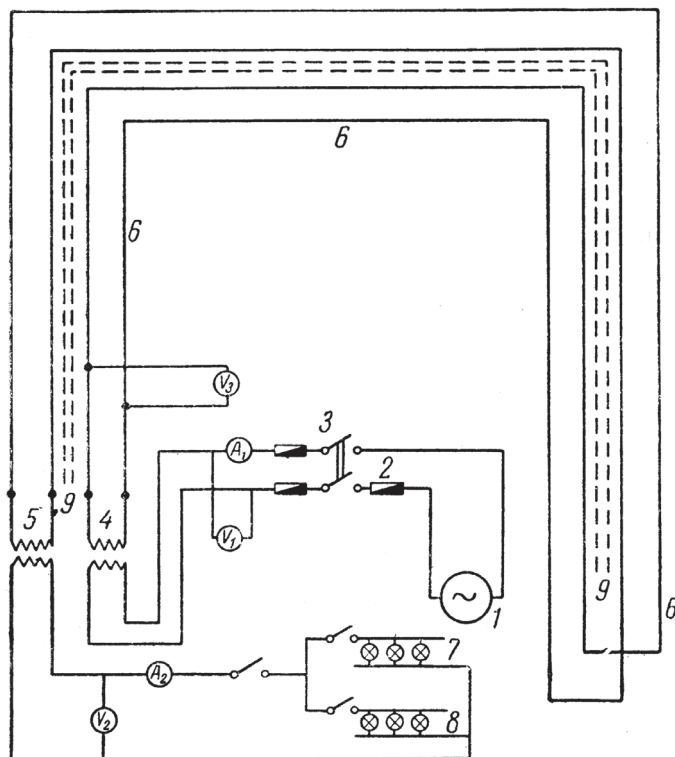


Рис. 4—1. Схема предварительного опыта в Эрликоне.

1 — генератор переменного тока, дающий напряжение до 120 в;
2 — маленький свинцовый предохранитель; 3 — двойной выключатель с большими двойными свинцовыми предохранителями;
 A_1, A_2 — амперметры; V_1, V_2 — вольтметры Кардью (тепловые);
4, 5 — трансформаторы с масляным охлаждением, с коэффициентом трансформации 1 : 300; V_3 — электростатический вольтметр В.Томсона; 6 — линия из медной проволоки диаметром 4 мм на фарфоро-масляных изоляторах; 7, 8 — комплекты ламп (несколько комплектов на 50, 65 и 100 в); 9 — двухпроводная телефонная линия.

В заключение опытов Доливо-Добровольский продемонстрировал всем присутствовавшим свою новую систему трехфазного тока на примере электродвигателя в 1 л. с. Доктор Оскар Мэй в февральском номере журнала «*Elektrotechnischer Anzeiger*» и в докладе на

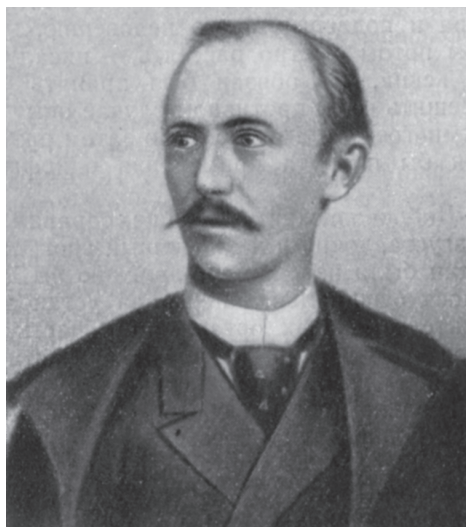
собрании Электротехнического общества во Франкфурте 9 февраля подробно описал результаты опытов в Эрликоне и впервые публично сообщил некоторые сведения о работах М.О.Доливо-Добровольского, о его системе «Drehstrom» [Л. 136 и 141].

25 марта 1891 г. состоялось следующее совещание заинтересованных фирм, где были уточнены детали проектирования электропередачи. Накануне этого совещания, 20 марта 1891 г., электротехническую общественность подробно ознакомили с новой системой Доливо-Добровольского путем опубликования его статьи о трехфазном токе [Л. 4].

На совещании 25 марта было решено поручить фирме АЭГ изготовление четырех трансформаторов по 100 *кв*а, асинхронного электродвигателя на 100 л. с., 1000 ламп накаливания по 16 нормальных свечей (т. е. примерно по 55 *вт*) и всей измерительной и коммутационной аппаратуры. Фирме Эрликон предстояло изготовить синхронный генератор мощностью около 300 л. с. и два трансформатора по 150 *кв*а. Проектирование воздушной линии было поручено инженеру ЭБЕРТУ, а изготовление проводов было заказано фирме «Гессе и сыновья», которая взялась безвозмездно, в целях рекламы, передать 60 *т* медной проволоки выставочному комитету на весь период выставки.

Директор АЭГ Э. Ратенау под влиянием многочисленных отрицательных высказываний, несмотря на благоприятные опыты в Эрликоне, не мог решиться на применение запроектированного напряжения 25 *кв*. Репутация фирмы все же казалась ему дороже заманчивой, но еще мало реальной перспективы. Он успокоился только тогда, когда Доливо-Добровольский согласился первое время применять напряжение не выше 15–16 *кв*, а затем, если опыты будут удачными, повысить напряжение до 25–30 *кв*.

Пока велись переговоры, время шло, и стало уже ясно, что к открытию выставки, назначенному на 16 мая, передача не будет готова. На очередном совещании 6 апреля выяснилось, что изготовление трансформаторов задерживается, и поэтому электропередача может быть выполнена только к 15 августа. Этот срок и был утвержден



М. О. Доливо-Добровольский в 1896 г.

с условием, что в случае его нарушения фирмы должны выплатить неустойку в размере 51 000 германских марок. В апреле началась установка опор по всей трассе линии.

Можно вообразить себе те темпы и то напряжение в работе, какие были необходимы М.О.Доливо-Добровольскому для успешного воплощения в жизнь своих трудов и своей мечты. Он всего за полгода должен был спроектировать и построить небывалые по мощности асинхронный двигатель (100 л. с.) и трансформаторы (100–150 ква). Достаточно сказать, что максимальная мощность однофазных трансформаторов составляла тогда только 30 ква. Самое неприятное заключалось в том, что не могло быть и речи об опытных конструкциях: для того не было времени. Но мало того, даже построенные двигатель и трансформаторы не могли быть испытаны на заводе: для этого в Берлине не было трехфазного генератора соответствующей мощности. Генератор для Лауфенской станции строился в Эрликоне. Следовательно, все элементы электропередачи предстояло включить непосредственно на выставке, в присутствии многих представителей и бесчисленных корреспондентов. Малейшая ошибка была бы

непростительной. В довершение всего на плечи Доливо-Добровольского легла вся ответственность, связанная с необходимостью наблюдения за проектированием и монтажными работами во время сооружения электропередачи. Начиная работать вместе с ним Броун как раз в это время собрался уходить из фирмы Эрликон [Л. 37].

Задача, вставшая перед Доливо-Добровольским, была необычайно трудной и ответственной.

«Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмываемого позора и подвергнуть его недоверию, которое вряд ли удалось бы потом быстро рассеять, — писал позднее Доливо-Добровольский, — я обязан был принять на себя эту задачу и разрешить ее. В противном случае опыты Лауфен — Франкфурт и многое, что должно было затем развиться на их основе, пошли бы по пути применения однофазного тока» [Л. 37].

И Доливо-Добровольский блестяще справился со своей задачей: 15 августа, точно в назначенный срок, все элементы электропередачи были переданы правлению выставки. 24 августа состоялась официальная передача установки представителям правительственных организаций, часть из которых находилась при этом в Лауфене, а другая часть на границей земель Баден и Гессен. Многочисленность представителей объяснялась довольно простым обстоятельством. Дело в том, что линия электропередачи пересекала территории четырех германских земель: Бадена, Вюртемберга, Гессена и Пруссии, органы власти которых по-своему относились к сооружаемой линии. Всех их объединяла боязнь высокого напряжения, неподдельное чувство страха перед деревянными столбами, украшенными табличками с черепами. Особые опасения связывались с возможностью обрыва провода и падения его на рельсы железной дороги. Выставочному комитету и соорудившим линию фирмам пришлось провести огромную разъяснительную работу, различными средствами и методами убеждать правительственных чиновников в том, что все опасности предусмотрены и линия надежно защищена. Администрация Бадена все же отказала в разрешении соединить участки уже готовой линии на баденской границе, что вызвало возмущение выставочного

комитета и, как впоследствии рассказывал Миллер, дело дошло до оскорблений служащих правительственного аппарата и не обошлось без бочонка вина для примирения [Л. 140].

Для того чтобы устранить последнее препятствие на пути своей системы и рассеять сомнения местных властей, Доливо-Добровольский провел опасный, но, пожалуй, наиболее убедительный эксперимент. Когда в 8 часов вечера линия впервые была включена под напряжение, один из проводов на границе Бадена и Гессена искусственным путем был оборван, и он с яркой вспышкой упал на рельсы железной дороги. Доливо-Добровольский сейчас же подошел и поднял провод голыми руками: настолько он был уверен, что сработает спроектированная им защита! Этот «метод» испытаний, строжайше запрещенный в настоящее время всеми инструкциями по технике безопасности, оказался единственным, который снял последнюю преграду перед испытанием новой системы.

25 августа в 12 часов дня на выставке впервые зажглось 1000 электроламп, питаемых током лауфенской гидроэлектростанции. Эти лампы обрамляли щиты и арку над входом на территорию участка выставки, относящегося к электропередаче Лауфен – Франкфурт (рис. 4-2). На следующий день был успешно испытан двигатель мощностью около 75 *квт* (100 л. с.), который 12 сентября впервые привел в действие 10-метровый декоративный водопад. Несмотря на то, что линия, машины, трансформаторы, распределительные щиты изготовлялись в спешке, что некоторые детали по свидетельству Доливо-Добровольского придумывались в течение часа [Л. 36], вся установка, включенная без предварительных испытаний, к удивлению одних и радости других сразу же стала работать весьма хорошо.

Особое впечатление на свидетелей этого торжественного момента производил водопад, низвергавшийся с 10-метровой скалы. Доливо-Добровольский рассказывал, что среди публики существовало мнение, что будто в этом водопаде журчит «настоящая вода из Неккара», передаваемая во Франкфурт из Лауфена [Л. 142]. Однако лица, более осведомленные в вопросах физики и электротехники,

радовались в этот день не огромному красивому водопаду, разбиравшемуся стеклянными щитками на тысячи брызг, подсвеченных десятками разноцветных ламп, их приводило в восторг понимание того, что этот прекрасный водопад приводится в действие энергией другого водопада, находящегося на расстоянии 170 км от первого, на реке Неккар у местечка Лауфен. Этот водопад явился символом новой большой победы человечества над природой. Это был триумф системы трехфазного тока, это было блестящее решение проблемы передачи энергии на большие расстояния.

Познакомимся более детально с важнейшими элементами Лауфен-Франкфуртской электропередачи и результатами ее испытаний. Наиболее достоверным источником сведений о названной передаче следует считать официальный отчет испытательной комиссии, опубликованный в двух томах в 1893 и 1894 гг. [Л. 143]. В I томе этого отчета излагается история подготовки Франкфуртской выставки и приводится подробное описание ее экспонатов. II том является собственно отчетом испытательной комиссии. Вся комиссия, возглавляемая, как уже упоминалось, Г.Гельмгольцем, была разделена на отдельные комиссии по основным объектам выставки. Испытание Лауфен-Франкфуртской передачи проводилось комиссией под руководством д-ра ВЕБЕРА 11–15, 18–22 и 25–27 октября 1891 г. (официальное закрытие выставки состоялось 19 октября).

Едва ли могут быть сомнения в достоверности результатов испытаний, приведенных в указанном отчете. В этом заключении нас убеждают интернациональный состав испытательной комиссии и необычайная тщательность измерений. Об этом же говорил один из членов комиссии русский инженер Р.Э.Классон, являвшийся представителем России. Вначале он был в составе группы по испытанию экспонатов отдела «Производство и распределение энергии», а затем участвовал в испытаниях электропередачи Лауфен – Франкфурт. По поводу опубликования «Официального отчета» Классон писал следующее: «Участие в числе членов комиссии большинства известных электротехников Европы и отчасти Америки гарантировало беспристрастие и всесторонность оценки

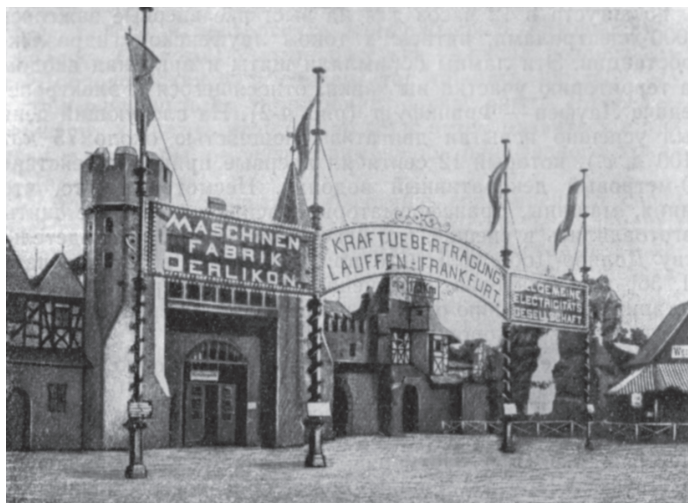


Рис. 4—2. Внешнее оформление участка выставки во Франкфурте.
Справа виден водопад, приводившийся в действие двигателем
Доливо-Добровольского.

испытываемых машин и приборов, а программы испытаний были составлены так широко, что отчет должен был представить в высшей степени ценный вклад в электротехническую литературу» [Л. 144].

Нужно отметить, что опубликования «Официального отчета» с нетерпением ждали все электрики. Длительная задержка в опубликовании послужила в то время поводом к тому, чтобы вновь раздалась смолкнувшие было голоса скептиков и явных противников трехфазного тока. На этот раз они утверждали, что комиссия не решается опубликовать неблагоприятные результаты испытаний. М.О.Доливо-Добровольский в связи с этим специально выступал 5 апреля 1892 г. в заседании Электротехнического общества [Л. 145] Для того чтобы положить конец сомнениям относительно результатов испытаний, он сообщил средний к. п. д. С той же целью в печати выступил в 1892 г. директор Губер [Л. 146]. Причиной задержки «Отчета» была действительно Лауфен-Франкфуртская передача, но именно потому, что при испытаниях было снято огромное число показаний различных приборов, обработка которых потребовала значительного времени.

Например, прежде чем приступить к испытаниям, комиссия тщательно выверяла все измерительные приборы; попытка учесть потери в подводящих проводах ваттметров и вольтметров была оставлена только после того, как убедились, что эти потери составляют менее 0,05 % общей мощности. Все испытания производились сериями, причем в каждой серии, продолжавшейся примерно 10 мин, делалось до 30 отсчетов на всех приборах; отсчеты сводились в таблицы, на основании которых получались средние значения.

Начнем описание деталей Лауфен-Франкфуртской электропередачи с гидроэлектростанции.

Река Неккар в районе Лауфена имеет водопад с падением 3,87 м и расходом воды от 40 до 42 тыс. л/сек. Следовательно, общая располагаемая мощность составляла примерно 2 000 л. с., а если принять к. п. д. турбин 75 %, то полезная мощность гидросиловой установки исчислялась примерно в 1500 л. с. Часть этой мощности (600 л. с.) использовал Вюртембергский завод портландского цемента, а остальная мощность (900 л. с.) предназначалась для гидроэлектростанции, которая должна была снабжать электроэнергией город Хейльбронн. Выше уже указывалось, что вначале предполагалось установить в Лауфене генераторы постоянного тока, но строитель станции Оскар фон-Миллер решил затем применить трехфазный ток и использовать гидроэлектростанцию в период Франкфуртской выставки в известных нам целях.

Одна из турбин гидросиловой установки с максимальной мощностью 304 л. с. была выделена для привода трехфазного генератора. Турбина позволяла регулировать расход воды от 0 до 4 000 л/сек и имела номинальную скорость 38 об/мин.

Вал турбины соединялся через коническую зубчатую передачу с валом трехфазного синхронного генератора, спроектированного Броуном на мощность порядка 220 ква (300 л. с.) и 150 об/мин. На рис. 4-3 показан внешний вид этого непривычного для взгляда нашего современника генератора. Внешний диаметр статора составлял 1 894 мм, а внутренний — 1 764 мм, тогда как длина составляла всего 380 мм. В 96 закрытых пазах статора были уложены медные

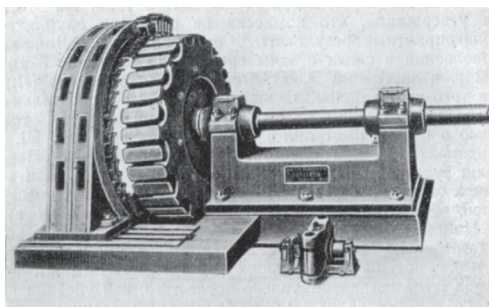


Рис. 4—3. Генератор Ч. Броуна (220–230 ква, 95 в, 40 гц, 150 об/мин). Индуктор генератора выдвинут вправо.

стержни диаметром 29 мм, заключенные в асбестовые трубки¹. Схема обмотки (соединение звездой) представлена на рис. 4-4, где цифрами обозначены порядковые номера стержней (пазов). Воздушный зазор машины составлял 6 мм. Оригинальной и наиболее неудачной частью машины был ротор гребенчатой формы (с клювообразными полюсами, подобными применяемым в настоящее время индукторам в тракторных генераторах с постоянными магнитами). Обмотка возбуждения (496 витков проволоки диаметром 5 мм) размещалась между двумя стальными щеками с клювообразными выступами по

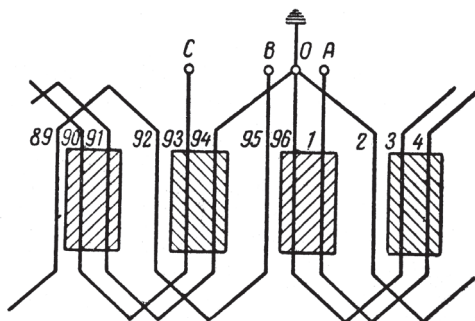


Рис. 4—4. Схема статорной обмотки лауфенского генератора.

¹ Броун первым стал применять закрытые пазы, т. е. отверстия, выштампованные по периферии листов стали статора.

периферии, поочередно заходящими друг за друга (рис. 4-5). Всего имелось 32 полюса, или 16 пар полюсов. Такое использование машины было вызвано стремлением снизить мощности возбуждения и расход меди, поскольку применялась всего одна катушка. Однако Броун не учел, что клювообразные выступы имеют большую поверхность рассеяния.

Доливо-Добровольский указал на этот недостаток директору Губеру, но тот, учитывая руководящее положение Бруна в фирме, не счел нужным сделать последнему соответствующее замечание. Большое рассеяние при сравнительно малом потоке возбуждения неизбежно должно было привести к резким колебаниям напряжения при изменении нагрузки. И это действительно имело место. Именно по этой причине нельзя было и думать о запуске 100-сильного двигателя во Франкфурте без пускового реостата, тем более, при включенной параллельно световой нагрузке.

Подвод тока к обмотке возбуждения осуществлялся при помощи изолированных роликов и двух бесконечных стальных лент.

От генератора три медные шины круглого сечения диаметром 27 мм вели к распределительному щиту, изготовленному АЭГ. На щите были установлены амперметры и вольтметры, свинцовые предохранители и максимально-минимальные токовые реле, воздействовавшие на цепь возбуждения. От распределительного щита к трансфор-

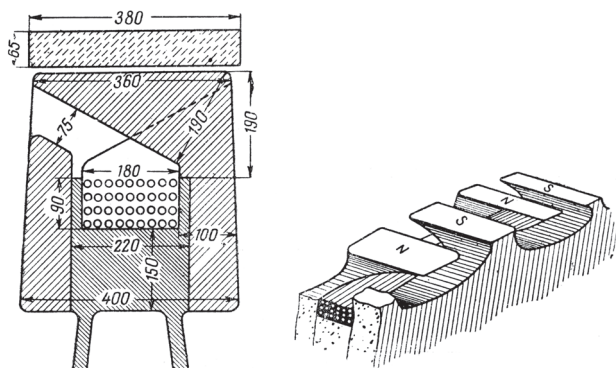


Рис. 4—5. Детали индуктора лауфенского генератора.

матору подвод был сделан тремя одножильными освинцованными кабелями сечением 400 мм^2 каждый.

В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора «призматического» типа (рис. 4-6). Четыре трансформатора были изготовлены заводом АЭГ, а два — заводом Эрликон. Трансформаторы фирмы Эрликон проектировались Броуном и отличались от уже спроектированных Доливо-Добровольским трансформаторов АЭГ лишь размерами и конструкцией масляного бака. Обмотки всех трансформаторов соединялись в звезду.

Как уже отмечалось, линия проектировалась в расчете на напряжение 25–30 кВ, и работа электропередачи во время выставки при напряжении 15 кВ была обязана случайному обстоятельству, а именно, осторожности директора Ратенау, не рискнувшего применить более высокое напряжение. Для того чтобы впоследствии иметь возможность испытать работу линии при напряжениях порядка 25 кВ и были построены четыре трансформатора АЭГ: предполагалось включать по два трансформатора на каждом конце линии таким образом, чтобы их обмотки низшего напряжения были соединены параллельно, а обмотки высшего напряжения — последовательно.

В табл. 1 указаны номинальные мощности и коэффициенты трансформации трансформаторов АЭГ и Эрликон.

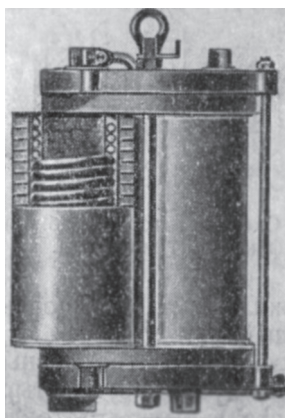


Рис. 4—6. Трансформатор АЭГ.

Таблица I

Трансформатор фирмы	Мощность, к ^{ва}	Коэффициенты трансформации	
		Повышающий трансформатор	Понижающий трансформатор
АЭГ	100	1:160	1:123
Эрликон	150	1:154	1:116

Сердечники трансформаторов были набраны из листовой стали толщиной 0,5 мм с бумажными прокладками толщиной 0,08 мм. Трансформаторы были погружены в баки, наполненные смоляным маслом. Для более полного удаления влаги трансформаторы на месте еще раз нагревались¹.

На рис. 4-7 представлен общий вид электрической части Лауфенской гидроэлектростанции, а на рис. 4-8 — план и разрез станции.

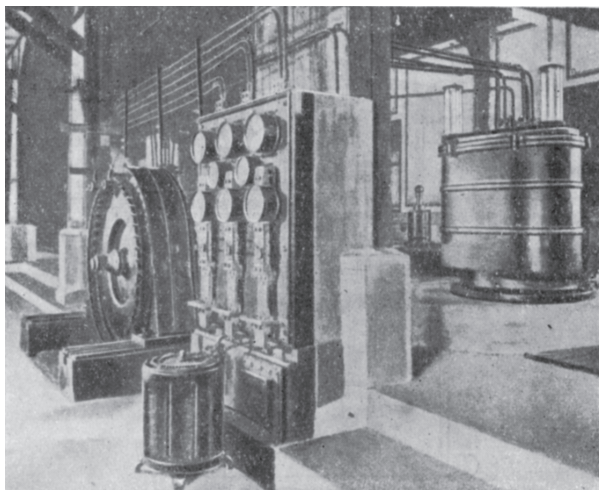


Рис. 4—7. Общий вид электрической части гидроэлектростанции в Лауфене.

¹ Основные размеры, например, трансформатора Эрликон, были следующие: сечение стержней — 270 см²; их высота — 990 мм; внешний диаметр кольцевого ярма — 910 мм, а внутренний — 490 мм; высота ярма — 76 мм.

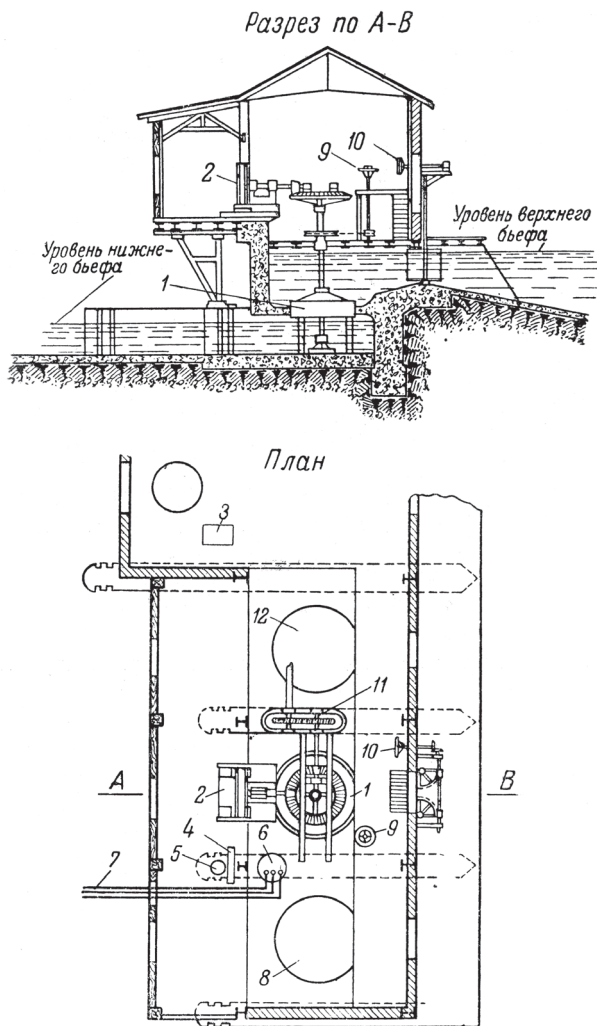


Рис. 4—8. План и разрез лауфенской гидроэлектростанции.

1 – гидротурбина; 2 – генератор; 3 – возбудитель; 4 – распределительный щит; 5 – реостат; 6 – трансформатор; 7 – линия передачи; 8 – место для второго генератора; 9 – штурвал для регулирования скорости; 10 – штурвал для управления щитовым затвором; 11 – передача к резервной турбине; 12 – резервная гидротурбина.

Трехпроводная линия была подвешена на 3 182 деревянных опорах, высотой 8 и 10 м со средним пролетом 60 м. Трасса линии (рис. 4-9) проходила вдоль железной дороги в долине Неккара от Лауфена до Эбербаха, а дальше — по кратчайшему расстоянию до Ханау и поворачивала к Франкфурту. Штыревые фарфоро-масляные изоляторы располагались один на верхушке столба, а два других — на деревянной перекладине (треугольник с основанием 1 м и высотой 1,16 м). Часть линии от Лауфена до Эбербаха (около $\frac{1}{3}$ длины всей линии) была смонтирована на «больших» изоляторах с тремя масляными кольцами, а другая часть — на «малых» изоляторах с од-

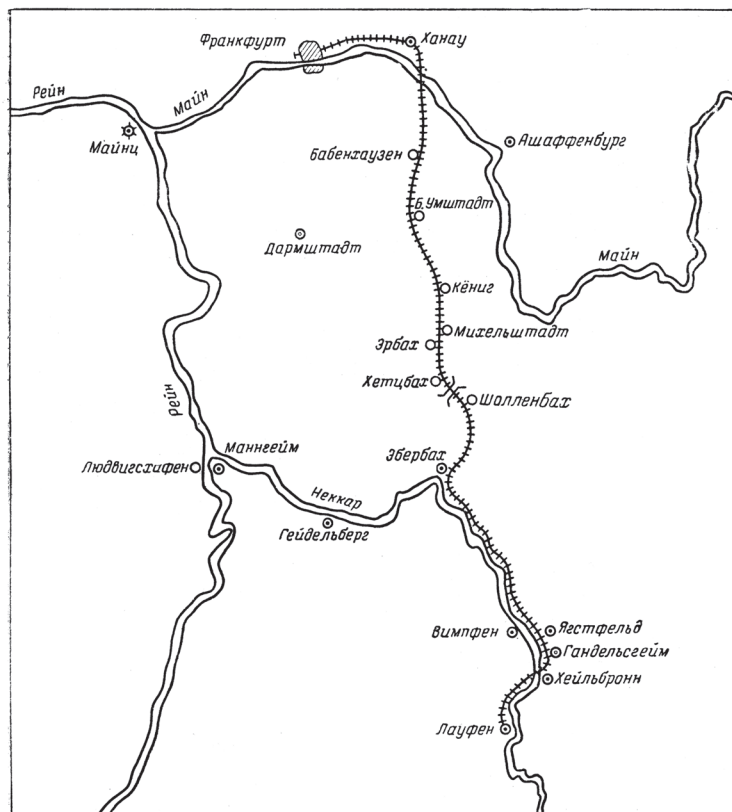


Рис. 4—9. Трасса линии Лауфен — Франкфурт.

ним масляным кольцом (рис. 4-10). Первоначально предполагалось, что вся линия будет снабжена большими изоляторами, но фирма не сумела в короткий срок изготовить необходимое число таких изоляторов и большую часть линии пришлось монтировать на малых изоляторах. В некоторой мере это также явилось причиной, не позволившей решиться на применение сразу очень высокого напряжения¹. Большие изоляторы имели диаметр 230 и высоту 220 мм, а малые соответственно 100 и 100 мм. Все изоляторы перед установкой были испытаны на заводе АЭГ при напряжении 30 кВ.

Точная длина линии согласно данным испытательной комиссии составляла 169,93 км или, с округлением, 170 км.

Никаких выключателей на линии не было. Генератор и трансформатор соединялись в блок. Для того чтобы в случае необходимости можно было быстро отключить линию, были предусмотрены два

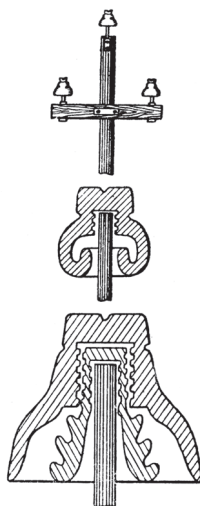


Рис. 4—10. Изоляторы линии Лауфен-Франкфурт.

¹ Тем не менее за все время работы линии произошли лишь два случая порчи изоляторов: один пробился при включении линии на напряжение, а другой разбился, как впоследствии установили, вследствие заводского брака. Любопытно, что оба случая пришлось на долю больших изоляторов с тремя масляными кольцами [Л. 161].

оригинальных приспособления. Рядом с лауфенской гидростанцией были установлены две опоры на расстоянии 2,5 м одна от другой. Здесь в разрыв каждого провода линии включалась плавкая вставка, состоявшая из двух медных проволок диаметром 0,15 мм и длиной 2,5 м. Для удобства обслуживающего персонала, которому приходилось заменять сгоревшие вставки, на опорах была устроена площадка, к которой вела лестница (рис. 4-11). Во Франкфурте и на всех промежуточных железнодорожных станциях были установлены «угловые замыкатели». Это был металлический брус, подвешенный при помощи шнура на Г-образной опоре. Достаточно было дернуть за шнур, как брус опускался на все три провода, расположенные в этом месте в одной плоскости, и возникало трехфазное короткое замыкание. В тот же момент перегорали только что описанные плавкие вставки в Лауфене, турбина, оказавшись разгруженной, развивала большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее. Линия обесточивалась и, включив в нее телефон, можно было из Франкфурта или из другого места сообщить машинисту о причине прекращения работы и дать команду о времени и порядке следующего включения линии.

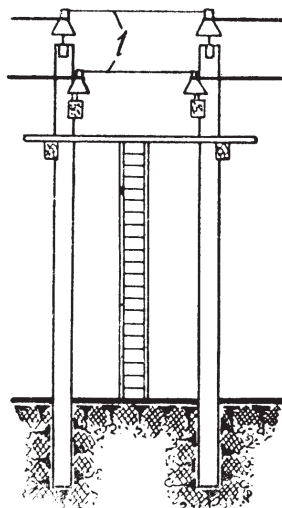


Рис. 4—11. Плавкие вставки в Лауфене.

Машинист после этого должен был заменить перегоревшие плавкие вставки и в указанное время пустить машины. Во время официальных испытаний связь между Франкфуртом и Лауфеном поддерживалась по государственному телеграфу.

На выставке в специальном павильоне был установлен понижающий трансформатор, к которому подключалась ламповая нагрузка. Большой трехфазный двигатель Доливо-Добровольского питался от отдельного трансформатора (АЭГ). В том же павильоне, в котором был установлен этот большой двигатель, Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный двигатель мощностью 1/10 л. с. с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 2 л. с., приводивший в движение генератор постоянного тока с ламповой нагрузкой. Общий вид экспонатов М.О.Доливо-Добровольского представлен на рис. 4-12.

Заслуживает более внимательного рассмотрения крупный асинхронный двигатель, служивший для привода в действие центробежного насоса мощностью около 100 л. с. Этот двигатель (рис. 4-13) был спроектирован Доливо-Добровольским на заданную скорость

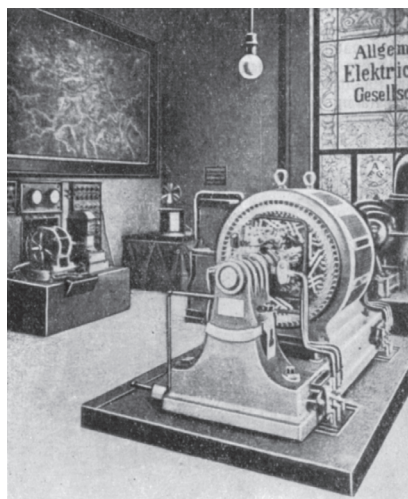


Рис. 4—12. *Общий вид экспонатов М.О.Доливо-Добровольского на выставке во Франкфурте.*

и частоту, которые составляли соответственно 600 об/мин и 40 гц¹. Отсюда сразу же устанавливалось, что обмотка двигателя должна была иметь четыре пары полюсов. В целях снижения потерь в стали двигатель был выполнен обращенным. Следовательно, ток от трансформатора при помощи трех колец подводился к обмотке вращающейся части, состоявшей из 80 медных стержней диаметром 29 мм каждый. Обмотка барабанная, стержни соединялись вилками на лобовых частях вращающейся части; эти вилки придавали приятный внешний вид конструкции машины.

Обмотка неподвижной части была выполнена по типу волновой обмотки машин постоянного тока (138 стержней диаметром 10 мм каждый) и имела выводы к жидкостному пусковому реостату. Поскольку вначале не было точно известно, при каком напряжении будет работать линия (15 или 25 кВ), Доливо-Добровольский спроектировал двигатель таким образом, чтобы его можно было легко переключить с одного напряжения на другое, иначе говоря, с треугольника на звезду. Для этого на противоположном конце вала было установлено еще три контактных кольца, и это позволило вывести оба конца каждой из трех фаз обмотки на распредели-

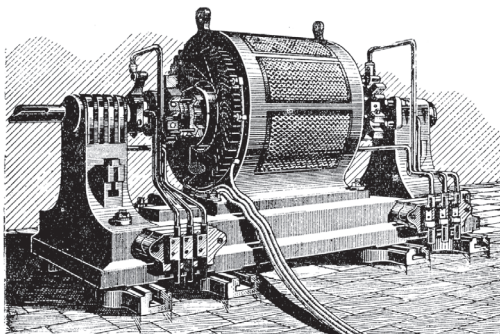


Рис. 4—13. Двигатель М.О.Доливо-Добровольского.

¹ Лауфенский генератор имел 16 пар полюсов и нормальную скорость 150 об/мин, следовательно, частота $f = \frac{pn}{60} = \frac{60 \cdot 150}{60} = 40$ гц.

тельный щит, где можно было осуществить переключение. Вращающаяся и неподвижная части двигателя были набраны из стальных листов, разделенных бумажными прокладками. Внешний корпус диаметром 700 мм находился в чугунном кожухе. Двигатель, включенный, как указывалось выше, без предварительных испытаний, все время работал безотказно, но, к сожалению, комиссией не испытывался. Только значительный опыт в области электромашиностроения, изобретательский талант и ясность теоретических представлений позволили Доливо-Добровольскому столь удачно построить необычайно крупный двигатель.

Трансформаторы и двигатель Доливо-Добровольского вызывали на выставке всеобщее восхищение. Несмотря на короткий срок они были выполнены очень удачно (Доливо-Добровольский отмечал только, что вал двигателя был несколько тонок). Это был очень большой «прыжок», как говорил Доливо-Добровольский. Двигатели талантливого инженера особенно удивляли английских и американских специалистов, которые считали себя «ведущими нациями» в области переменного тока и «им — писал Доливо-Добровольский, — представлялись все их теории поставленными на голову ...». «Как Вы отделались от самоиндукции», «Не было ли у Вас трудностей в преодолении самоиндукции», «Как это возможно, что двигатель, рассчитанный на 10 а, был в состоянии во время реверсирования брать свыше 100 а и тому подобные вопросы ставились мне ежедневно тамошними звездами» [Л. 36].

Мы видели выше, с какими трудностями приходилось сталкиваться строителям электропередачи. В первую очередь эти трудности были связаны с противодействием местных властей, опасавшихся применения очень высоких напряжений. Мы помним также тот метод, которым Доливо-Добровольский убедил правительственную комиссию в надежности защиты линии. Какими же средствами осуществлялась эта защита?

На рис. 4-14 представлена электрическая схема станции в Лауфене без измерительных приборов. Как видно из схемы, установка была выполнена с глухо заземленной нейтралью. Это было сделано

по проекту Доливо-Добровольского с целью повышения безопасности линии и явилось совершенно неожиданным для его современников. Заземление каких-либо частей электрического устройства считалось до тех пор дефектом, но никак не мерой предосторожности. На приемной станции во Франкфурте нулевые точки обмоток трансформатора также были соединены друг с другом через предохранитель и заземлены. Заземлены были и нейтральные точки обмоток двигателя, а лампы включались между фазой и нулем, т. е. на фазное напряжение.

В качестве защитных устройств электропередачи были предусмотрены: плавкие предохранители (1, 2, 3 на рис. 4-14) и максимально-минимальные токовые реле, работавшие на разрыв цепи возбуждения генератора (1', 2', 3'), а также описанные выше плавкие предохранители (1'', 2'' 3'') высокого напряжения. Заземление было осуществлено путем погружения в Неккар длинного медного каната. В одном из своих выступлений в Электротехническом обществе (22 ноября 1892 г.) Доливо-Добровольский говорил: «... запрещение заземлений является ошибочным... Как раз в целях безопасности необходимо заземление нейтральных точек электрических установок! И в особенности при воздушных проводках и подавно там, где должны применяться токи высокого напряжения. Вопреки цитированным авторитетам из некоторых компаний страхования от огня я утверждаю, что заземление нейтральных точек электрической си-

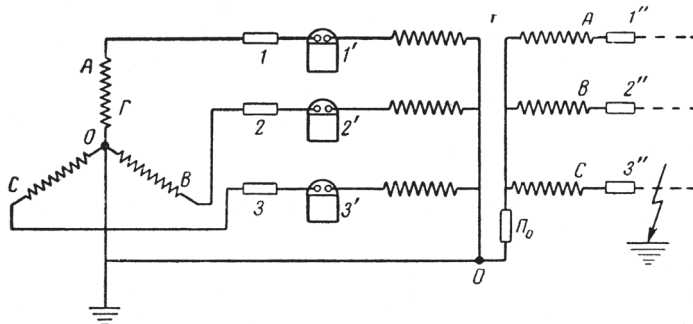


Рис. 4-14. Схема защиты электропередачи Лауфен – Франкфурт.

стемы представляет наиболее действенное средство против опасностей всех родов». И несколько далее: «...ко времени, когда из-за разрушения треснувшего изолятора в один из первых дней работы Лауфенской передачи провод упал на деревянный столб, и этот столб обуглился, я еще никакого заземления в Лауфене не устраивал. Это доказывает, что изолирование системы не только не устраняет пожарной опасности, но при определенных обстоятельствах даже повышает ее» [Д. 148].

В надежности защиты Лауфен-Франкфуртской электропередачи легко убедиться, если взглянуть на рис. 4-14 и представить себе, что один из проводов, например третий, замкнулся на землю. В этом случае немедленно сгорит предохранитель $3''$ высокого напряжения, а также может сгореть предохранитель Π_0 между нулевыми точками обмоток трансформатора. Таким образом, пораженная фаза будет отключена. Но мало того, если бы в силу каких-либо причин замедлилось действие предохранителей $3''$ и Π_0 , то сгорела бы плавкая вставка предохранителя 3 низкого напряжения. Токовое реле $3'$ при любых чрезмерных изменениях тока разрывает цепь возбуждения, а следовательно, снимает напряжение и на здоровых фазах.

Заземление нейтрали на генераторной и приемной станциях обеспечивало также большую безопасность для обслуживающего персонала¹.

Номинальный режим работы электропередачи задавался необходимостью поддерживать фазное напряжение на ламповой нагрузке во Франкфурте равным 65 в. Это условие выполнялось в том случае, когда первичное напряжение в Лауфене составляло: фазное – 55 в, а линейное – 95 в. Машинист на станции имел таблицу, согласно которой он регулировал напряжение в зависимости от токов, определяемых по амперметрам. Поскольку приборы для измерения высокого напряжения не успели изготовить, то высокое

¹ Однако при эксплуатации Лауфенской гидроэлектростанции, к сожалению, дело не обошлось без жертв. Электромонтер Рау был настолько неосторожен, что коснулся проводов высокого напряжения и был убит током.

напряжение определялось умножением первичного напряжения на коэффициент трансформации трансформатора. Следовательно, рабочее напряжение при использовании трансформатора Эрликон составляло $95 \times 154 = 14\,630$ в.

В октябре 1891 г. Международная испытательная комиссия приступила к испытаниям Лауфен-Франкфуртской электропередачи. Первоначально был составлен очень обширный план испытаний, но в связи с тем, что правление выставки установило для работы комиссии жесткие сроки, план пришлось сократить. Окончательно в план испытаний были внесены следующие вопросы:

1. Определение к. п. д. гидротурбины.
2. Определение отношения мощности, получаемой от трансформатора во Франкфурте, к мощности на валу гидротурбины (иначе говоря, определение к. п. д. электропередачи).
3. Определение к. п. д. генератора и трансформаторов.
4. Выяснение характера потерь в длинной линии, особенно влияния емкости.

Испытания начались с тщательной проверки измерительных приборов. Затем 10 октября в выставочном павильоне были установлены три ваттметра и несколько щитов с лампами, которые группами и по отдельности можно было включать и выключать. Таким образом, нагрузкой во Франкфурте служили лампы, которые могли потреблять максимальную мощность 110 кВт . После того как в Лауфен давалась команда о начале очередной серии испытаний, члены комиссии на электростанции поднимали фазное напряжение до 55 в и записывали мощность, отдаваемую турбиной, величину тока в трех шинах низкого напряжения, фазные напряжения, ток возбуждения и число оборотов генератора. В то же самое время во Франкфурте измерялась мощность каждой фазы (делался в каждой серии испытаний 31 отсчет показаний, которые затем сводились к 10 средним значениям) и фазные напряжения.

Все показания сводились в таблицы, так что впоследствии можно было получить окончательные средние результаты по каждой серии испытаний. Эти окончательные результаты приведены в табл. II.

Таблица II

Число	Время опыта	Мощность на валу турбины, л. с.	Скорость генератора, об/мин	Средний ток в первичной цепи, а	Фазное напряжение в первичной цепи, в	Среднее фазное напряжение в Лауфене, в	Мощность, потребляемая нагрузкой во Франкфурте, л. с.	Среднее фазное напряжение во Франкфурте, в	Средний ток нагрузки, а	К. п. д. передачи, %	Погода
12/Х	9 ч 40 мин. – 9 ч 50 мин.	190,9	149,2	867	55,7	8 580	142,3	64,3	543	74,5	Дождь от Хейльбронна до Эбербаха
То же	13 ч 35 мин. – 13 ч 45 мин.	126,7	148,9	688	53,9	8 300	95,1	64,9	360	75,0	
То же	13 ч 50 мин. – 14 ч 00 мин.	126,6	148,7	688	53,9	8 300	95,2	66,0	354	75,2	
14/Х	10 ч 45 мин. – 10 ч 55 мин.	151,8	149,8	737	55,5	8 550	113,9	67,3	417	75,0	
То же	11 ч 00 мин. – 11 ч 10 мин.	151,8	149,5	738	55,6	8 560	114,1	67,6	414	75,1	
То же	11 ч 35 мин. – 11 ч 45 мин.	194,4	150,4	876	56,2	8 650	114,4	63,3	560	74,3	
То же	12 ч 30 мин. – 12 ч 40 мин.	197,2	151,2	882	56,1	8 640	145,6	62,6	571	73,8	Пасмурная погода вдоль всей линии, но без дождя
То же	13 ч 30 мин. – 13 ч 40 мин.	117,5	150,2	653	53,5	8 240	86,1	67,6	313	73,3	
То же	13 ч 45 мин. – 13 ч 55 мин.	112,5	149,5	641	52,4	8 070	82,2	65,8	307	73,1	
То же	14 ч 31 мин. – 14 ч 41 мин.	78,1	149,0	537	50,0	7 700	53,5	64,6	202	68,5	
15/Х	10 ч 53 мин. – 11 ч 03 мин.	190,6	150,0	865	54,6	8 410	139,0	60,9	560	72,9	С утра сильный дождь во Франкфурте
То же	11 ч 03 мин. – 11 ч 13 мин.	190,0	151,0	864	54,6	8 410	138,9	60,7	561	73,1	
То же	11 ч 20 мин. – 11 ч 30 мин.	189,8	150,4	864	54,5	8 390	138,9	60,7	561	73,2	

Из этой таблицы следует, что к. п. д. электропередачи колебался между значениями 68,5 % и 75,2 %, но, как правило, был близок к 75 %. Это был, безусловно, хороший результат, заставивший немедленно смолкнуть всех, кто предсказывал неудачу лауфен-франкфуртскому эксперименту.

Результаты других испытаний оказались следующими:

к. п. д. лауфенского генератора при номинальной нагрузке ¹	95,4 %
к. п. д. трансформаторов АЭГ	96 %
к. п. д. трансформаторов Эрликон	95,7 %
средние потери мощности в линии передачи	17,5 <i>квт</i>

Проведенный расчет для определения потерь, обусловленных емкостью линии, показал, что эти потери незначительны: они составляют величину порядка 2 *квт* и на к. п. д. почти не сказываются.

Интересен заключительный вывод комиссии: « ... работа линии с переменными токами напряжением от 7 500 до 8 500 *в* (фазное — *О. В.*), изолированной маслом, фарфором и воздухом, длиной больше ста километров, протекала всегда равномерно, безопасно и без нарушений, как и работа с переменными токами напряжением в несколько сот вольт и при длине в несколько метров» [Л. 143].

Когда были закончены основные испытания, строители электропередачи Лауфен — Франкфурт решили исполнить свое первоначальное намерение: испытать линию при напряжениях свыше 25 *кв*. Они имели в своем распоряжении несколько дней до 5 ноября включительно, после чего гидроэлектростанция должна была перейти в собственность города Хейльбронна.

Быстро составила новая комиссия. Поскольку некоторые профессора — члены основной испытательной комиссии (в том числе и Вебер) — должны были вернуться к своей академической деятельности, пришлось обратиться к другим специалистам. Возглавили

¹ Результат получен экстраполированием, так как больше 190 л. с. генератор не нагружался.

новую комиссию бывший учитель Доливо-Добровольского, всегда внимательно следивший за работами своего ученика проф. Э. Китлер и доктор Линдлей. В числе ассистентов был молодой русский инженер Р.Э.Классон. В опытах также участвовали от АЭГ Доливо-Добровольский и доктор Лобах, а от Эрликон инженер Хальдер, заменивший ушедшего из фирмы Броуна. К работе в первой (основной) комиссии заинтересованные лица не допускались.

Комиссия снова произвела проверку всех измерительных приборов и приступила 2 ноября к испытаниям по схеме рис. 4-15. В этих испытаниях использовались трансформаторы АЭГ, по два на каждом конце линии, причем обмотки низкого напряжения трансформаторов были соединены параллельно, а обмотки высокого напряжения – последовательно.

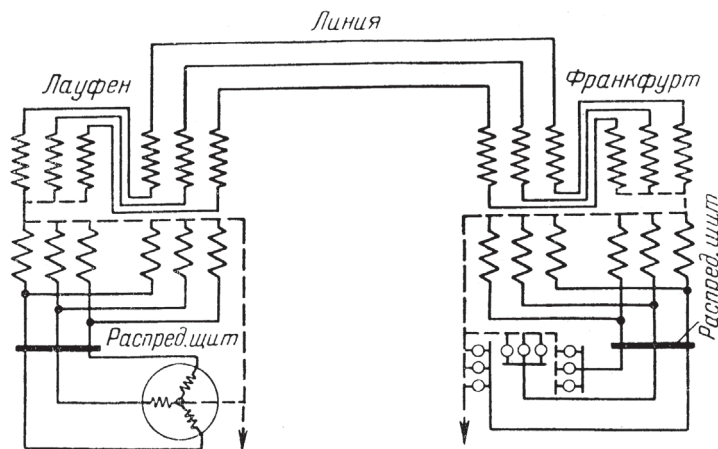


Рис. 4–15. Схемы испытаний электропередачи Лауфен – Франкфурт при напряжениях свыше 25 кв.

При первой же попытке пустить в ход установку обнаружили неожиданные и необычные явления. Вот как пишется об этом в отчете комиссии: «Если при возбужденных электромагнитах и относительно небольшой нагрузке пустить машину в ход и постепенно повышать ее скорость, то напряжение и ток сначала повышаются

равномерно. Однако, как только превышалось определенное число оборотов, генератор внезапно начинал сильно гудеть и обесточивался. Эти явления всегда возникали при повторных запусках и прекратились только тогда, когда по указанию г. Доливо-Добровольского была существенно ограничена скорость машины и повышена сила тока возбуждения» [Л. 143].

Почему Доливо-Добровольский дал такое указание? Дело в том, что он очень быстро нашел причину столь странного поведения генератора. Он не сомневался, что эта причина заключена в реакции якоря. Действительно, уже в первый день новых испытаний заметили, что удвоенная величина напряжения достигается при значительно меньшем возбуждении машины, чем это было при основных испытаниях, когда напряжение составляло около 15 кв. Если раньше на возбуждение потреблялось $10\text{ а} \times 20\text{ в} = 200\text{ вт}$, то теперь лишь $3\text{ а} \times 6\text{ в} = 18\text{ вт}$.

Подробное объяснение этим явлениям было дано М.О.Доливо-Добровольским в сообщении, которое он сделал в Электротехническом обществе 24 ноября 1891 г. [Л. 9]. Он указал, что при частоте 40 гц и высоком напряжении начинает сильно сказываться емкостная проводимость линии, результатом чего является существенное увеличение емкостного тока (было замечено, что емкостный ток при холостом ходе линии по величине был почти равен току, который протекал в линии при полной нагрузке). Но емкостной ток, или, как его называл Доливо-Добровольский, «безваттный зарядный» ток опережает напряжение по фазе на 90° . Это наглядно было показано им в докладе Франкфуртскому конгрессу электротехников.

«Этот ток создает поэтому в якоре генератора полюса, которые поддерживают магнитное поле, и машина становится почти самовозбуждающейся» [Л. 9]. Так Доливо-Добровольский совершенно точно вскрыл причину малого возбуждения машины при работе на холостую линию. Здесь он использовал незадолго до этого опубликованное английским электриком Суинбёрном исследование о влиянии реакции якоря на работу машины при различных фазах тока. Доливо-Добровольский умело применил эти исследования

к конкретному случаю работы синхронного генератора на длинную линию.

Более сложным, однако, оказалось объяснение причины обесточивания генератора, работающего на длинную линию с небольшой активной нагрузкой (во Франкфурте включалось несколько комплектов ламп). Доливо-Добровольский не нашел точных методов анализа этого явления, но интуитивно почувствовал характер процесса. Он говорил: «Здесь можно предположить такой сдвиг полюсов якоря, что они в некоторой степени как бы «перескакивают» в следующее поле» [Л. 9]. Это замечание следует понимать как предположение того, что характер тока внезапно изменяется и вместе с тем внезапно изменяется реакция якоря с опережающей, т. е. емкостной, на отстающую, т. е. индуктивную.

Такое „внезапное“ изменение характера тока, как известно, может иметь место при резонансе. По-видимому, комиссия, испытывавшая Лауфен-Франкфуртскую электропередачу, и наблюдала впервые в практических условиях явление резонанса. Действительно, что могло происходить при экспериментах? При малом возбуждении машины, которое требовалось при холостом ходе линии, постепенно повышали ее скорость, т. е. повышали частоту тока. Схемой замещения установки можно принять цепь, состоящую из индуктивного сопротивления (синхронное индуктивное сопротивление машины, индуктивное сопротивление трансформаторов, линии) и емкостного сопротивления. Для качественного анализа небольшую активную нагрузку во Франкфурте можно не учитывать. Таким образом, суммарное реактивное сопротивление цепи можно представить как $Z = \omega L - \frac{1}{\omega C}$.

С повышением частоты цепь приближалась к резонансу, который наступал при частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. При $0 < \omega_1 < \omega_0$ полное реактивное сопротивление $Z = \omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} < 0$, т. е. нагрузка генератора

имела емкостный характер, и ток в якоре был опережающим, а реакция якоря была намагничивающей. Но как только частота увеличивалась сверх резонансной, т. е. при $\omega_2 > \omega_0$, полное сопротивление становилось $Z = \omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C} > 0$, и нагрузка принимала индуктивный характер. Реакция якоря становилась размагничивающей, и вполне понятно, что при малом возбуждении ток генератора почти пропал.

Наконец, при дополнительных испытаниях электропередачи наблюдалось еще одно «необычное» явление. М.О.Доливо-Добровольский, желая измерить падение напряжения между зажимами генератора и зажимами трансформатора к своему удивлению обнаружил вместо падения напряжения его повышение. Оказалось, что, в то время как на зажимах генератора напряжение составляло 45 в, на зажимах трансформатора оно было на 5 в выше.

Это явление можно понять, если вспомнить, что генератор с трансформатором был связан системой параллельно расположенных одножильных кабелей. Такое соединение обладало большой индуктивностью и, когда проходил емкостный ток (ток холостого хода линии), падение напряжения в соединительных кабелях имело отрицательный знак. Упрощенная схема замещения и векторная диаграмма (без учета незначительного активного сопротивления кабелей) для этого случая приведены на рис. 4-16. Доливо-Добровольский не сумел полностью объяснить это явление (нельзя забы-

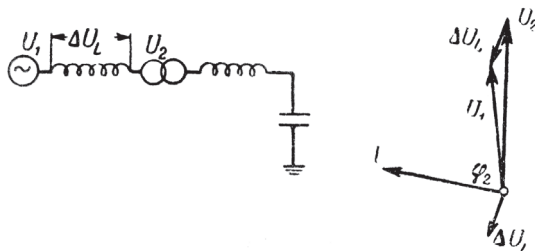


Рис. 4—16. К объяснению факта повышения напряжения между генератором и трансформатором.

вать, что теория переменного тока, как мы видели выше, находилась в зачаточном состоянии), но он не сомневался в том, что причина заключается в емкостном характере тока, так как с увеличением нагрузки во Франкфурте напряжения на зажимах генератора и трансформатора выравнивались.

Для того чтобы избежать описанных выше явлений, было решено работать при пониженной частоте. Опытным путем было установлено, что эти явления не наблюдаются в тех случаях, когда скорость генератора не превышает 90 об/мин. Эта скорость и была принята в качестве нормальной. Следовательно, частота составляла

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{16 \cdot 90}{60} = 24 \text{ гц.}$$

В итоге проведенных опытов были получены следующие основные результаты:

минимальный к. п. д. при нагрузках, близких к номинальным	75 %
максимальный к. п. д. при нагрузке 132 квт и напряжении в Лауфене 25 100 в	78,9 %
максимальное напряжение при испытаниях	28 300 в

К сожалению, полного объема испытаний выполнить не удалось. Уже в первый же день испытаний 2 ноября опыты должны были временно прекратиться в связи с требованием Вюртембергской дирекции связи, обнаружившей сильные помехи телефонной связи Лауфен – Хейльбронн от индуктивного влияния со стороны опытной линии. Чтобы не терять времени, комиссия начала подготовку к опытам холостого хода линии и трансформаторов. Но едва пуск линии был снова разрешен и были сняты первые показания приборов, как были пробиты два изолятора и поврежден столб. Ремонт был закончен как раз в тот вечер, когда Лауфенская установка должна была согласно договору перейти в собственность города Хейльбронна (5 ноября). Когда вечером 5 ноября испытания возобновились, то по независящим от опытной установки причинам прервалась телеграф-

ная связь между Лауфеном и Франкфуртом, которая использовалась комиссией для передачи указаний в Лауфен. Опыты должны были вновь прекратиться и на этот раз окончательно.

Комиссия в своем отчете могла только сообщить достаточно полные результаты испытаний нагруженной линии (опыты 2 ноября) и некоторые отрывочные данные испытания холостого хода линии, проводившегося в течение 8 мин. Она указала на незначительное возбуждение генератора, при котором получалось полное напряжение в линии (мощность, затрачиваемая на возбуждение, составляла менее 0,25 % мощности генератора), и на повышение напряжения в соединительных кабелях между генератором и трансформатором.

Окончательный вывод комиссии был сформулирован следующим образом: «Передача энергии Лауфен — Франкфурт при линейном напряжении 25 000 в (фазное — 14 000–15 000 в) и при частоте 24 периода в секунду показала при полезной мощности около 180 л. с. к. п. д. примерно 75 %» [Л. 143].

Таковы были результаты испытаний электропередачи Лауфен — Франкфурт.

Международную электротехническую выставку, работавшую в период 16 мая — 19 октября 1891 г. посетило 1 200 000 человек. Большая часть посетителей побывала в павильоне Лауфен-Франкфуртской электропередачи. Интерес к ней был необычайно велик. Даже после закрытия выставки и прекращения испытаний линии в Лауфен все еще прибывали ученые, инженеры, техники и целые делегации из других городов и даже из-за границы для того, чтобы лично осмотреть станционные устройства знаменитой электропередачи [Л. 149].

И как это ни казалось бы странным, но вопреки фактам, вопреки несомненному и совершенному успеху Лауфен-Франкфуртской электропередачи, нашлись определенные лица и журналы, которые пытались опорочить результаты испытаний или, во всяком случае, снизить значение выдающегося эксперимента. Так, например, парижский «Petit Journal» опубликовал заметку следующего содержа-

ния: «Последний акт Франкфуртского электротехнического конгресса разыгрался в Лауфене. Знаменитые физики лично отправились к Неккарским водопадам, чтобы испытать там действие гидроустановки¹. Несмотря на редукцию, которая осуществляется для уменьшения скорости машин, оказалось, что турбина еще в состоянии дать 200 л. с. Сила, которая получается на выставке от помпы, питающей водопад, может составить не больше 30 или 40 л. с. Правда, ток питает еще 1 000 ламп накаливания (замечательная оговорка — *O.V.*), однако тот же ток больше не проходит через какие-либо промежуточные механизмы (?). Мы поэтому имеем основание полагать, что опыт хотя и интересен, но однако он еще очень далек от того, чтобы сделать действительными обещания, которые в изобилии распространялись перед открытием выставки. Благодаря столбам, украшенным мертвыми головами, еще не сказано последнее слово о передаче энергии на большие расстояния».

Вот образец соединения поспешности в суждениях с технической неграмотностью и фанатической предубежденностью! Этой своеобразной вылазке был дан решительный отпор французскими, немецкими и другими журналами [Л. 151].

Подавляющее большинство электриков во всех странах мира по достоинству оценили значение лауфен-франкфуртского эксперимента. Технические журналы всего мира систематически информировали своих читателей о ходе строительства и работе линии электропередачи, посвящали ей обзорные статьи. Наибольшую известность получили отчеты и описания, сделанные С. Томпсоном [Л. 84], Г. Каппом [152 и 153] и Эд. Госпиталье [Л. 154].

Журнал «Электричество» в обзоре успехов электричества и его применений в 1891 г. [Л. 155] писал следующее: «Минувший год на-

¹ Здесь имеется в виду следующий факт. 14 сентября 1891 г. фирмы АЭГ и Эрликон пригласили в Лауфен для осмотра электростанции около 100 человек — представителей местных властей, выставки и многих делегатов электротехнического конгресса. Среди них были такие крупные специалисты в области теоретической и практической электротехники, как М. Депре, Феррарис, Присс, С. Томпсон, Капп, Госпиталье и др. [Л. 164].

всегда останется памятным в истории электротехники; с ним всегда будет связано воспоминание о Франкфуртской выставке и о грандиозном опыте передачи силы из Лауфена с применением разновидности переменных токов, которым, может быть, суждено заменить во многих случаях токи постоянные и токи переменные... Система Доливо-Добровольского тем более интересна, что она единственная из всех, которая пока выдержала самое строгое испытание, именно испытание практического выполнения ее в больших размерах».

Инициатор осуществления электропередачи Оскар фон-Миллер, спустя четыре десятилетия, писал: «В наше время, когда осуществлены передачи электрической энергии при напряжении 100 000–200 000 в трудно себе представить, какую роль сыграл тогда этот скачок с 3 000 до 30 000 в и с 10 км до 200 км. Действительно, наступила новая эпоха в области передачи энергии...» [Л. 156].

Электропередача Лауфен – Франкфурт подвела итог трехлетней деятельности Доливо-Добровольского. Результаты этой передачи сразу выдвинули его на ведущее место среди электротехников и принесли ему мировую известность.

Крупная энергетическая проблема конца XIX в. – проблема централизованного производства электроэнергии и передачи ее на большие расстояния – была решена. Электрическая энергия в форме трехфазного тока из мест ее дешевого получения пришла к отдельному цеху, отделению, а затем и к отдельному станку. Вместе с тем производительные силы получили новую техническую базу, которая во многом способствовала углублению и расширению процесса концентрации и централизации производства. Важнейшим следствием возникновения техники трехфазного тока явилось то, что на его основе началось быстрое развитие электрификации народного хозяйства.

«Техника не заботится много о лабораторных опытах, – несколько гиперболизируя, говорил в 1900 г. Доливо-Добровольский, – мало интересуется теоретическими размышлениями и «возможностями», она приветствует открытия лишь тогда, когда ей покажут, что из них

можно кое-что «сделать», покажут хотя бы и не в законченной, но по крайней мере в сколько-нибудь практической форме» [Л. 29].

Трудно себе представить более «практическую форму», чем невиданная по своим масштабам электропередача Лауфен – Франкфурт.

Выполнением этой установки был закончен первый и наиболее значительный по своим результатам этап деятельности Доливо-Добровольского в области трехфазного тока. Но с равным основанием мы можем сказать, что с выполнением этой установки начался новый этап в развитии всей мировой электротехники.

«ЖИЗНЕОПИСАНИЯ ВЕЛИКИХ ЛЮДЕЙ ВСЕГДА
БЫЛИ БОГАТЫ УРОКАМИ, ВСЕГДА СЛУЖИЛИ
МОГУЩЕСТВЕННЫМ СТИМУЛОМ ВЫСОКИХ
СТРЕМЛЕНИЙ, — НА НИХ СМОТРЕЛИ ВСЕГДА КАК
НА АРСЕНАЛ, ГДЕ СОБРАНО ОРУЖИЕ, КОТОРЫМ
БЫЛИ ВЫИГРАНЫ ВЕЛИКИЕ БИТВЫ».

С. Льюис

ГЛАВА V

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Барабанные обмотки. Массивный ротор с беличьей клеткой. Методы пуска. Схема однофазного питания трехфазного двигателя. Индукторные генераторы. Схемы компаундирования синхронных генераторов. Регулирование напряжения одноякорных преобразователей. Способы увеличения числа фаз. Соединение обмоток трансформатора по схеме Δ/Y_0 . Вопросы теории электрических машин и трансформаторов.

1891 г. был годом действительного рождения техники трехфазного тока. М.О.Доливо-Добровольский совершил научный подвиг и, как писали журналы того времени, «поразительным образом выступил на выставке с законченной системой» [Л. 157]. Разработанные им до 1891 г. конструкции трехфазных машин были настолько удачны, что в принципе они не претерпели существенных изменений и до настоящего времени. Этих работ было бы вполне достаточно для того, чтобы увековечить имя талантливого изобретателя и ученого. Но не таков был Доливо-Добровольский, чтобы остановиться на каком-то этапе своего пути. Нет, он и дальше продолжал

трудиться и находить интересные и важные решения многих вопросов электротехники вообще и техники трехфазного тока в частности.

До 1903 г. почти все свое внимание Доливо-Добровольский уделял электрическим машинам и трансформаторам, лишь время от времени отвлекаясь для решения иных электротехнических проблем. Вполне понятно, что после того, как были созданы все основные принципиальные схемы и конструкции машин и трансформаторов, новые работы Доливо-Добровольского представляли собой, как правило, лишь решения частных, поставленных жизнью задач.

Целью настоящей главы является познакомить читателя с этими работами М.О.Доливо-Добровольского.

Выше упоминалось, что технология изготовления барабанной обмотки на рубеже 80-х и 90-х годов находилась на весьма низком уровне. Если же иметь в виду применение барабанной обмотки в трехфазных машинах, то положение усугублялось тем, что Доливо-Добровольский в целях уменьшения рассеяния впервые ввел в практику электромашиностроения полузакрытые пазы. Благодаря этому удалось существенно уменьшить сопротивление магнитной цепи машины, следовательно, значительно уменьшить объем, занимаемый обмоткой статора. Но если в машинах постоянного тока при открытых пазах барабанная обмотка выполнялась без существенных затруднений, то при полузакрытых пазах изоляция стержней часто повреждалась.

Стремление уменьшить рассеяние в машине требовало перехода к барабанному типу обмотки, а желание упростить и сделать более прочной эту обмотку привело Доливо-Добровольского к оригинальной конструкции двигателя с вспомогательным трансформатором.

На эту конструкцию Доливо-Добровольский получил патенты: в Германии № 56757 от 1 ноября 1890 г., в Англии № 20424 от 15 декабря 1890 г. и в Швейцарии № 2991 от 19 декабря 1890 г.

Обмотка статора в этом двигателе выполнялась из нескольких прочных медных стержней-болтов (рис. 5-1), число которых зависе-

ло от числа фаз. Так, на рис. 5-1 изображены конструкции обмотки статора для трехфазной сети и для двухфазной (при одной паре полюсов на фазу). Эти стержни с одной стороны замыкаются медным диском (или кольцом), а с противоположной стороны заканчиваются резьбой с гайкой, являясь, таким образом, одновременно и зажимами машины. Стержни пропускаются через пакет статора в закрытых пазах и изолируются. Закрытые пазы, как уже упоминалось, Доливо-Добровольский заимствовал из конструкций Броуна. Такие пазы в машинах Доливо-Добровольского являлись переходной формой к полузакрытым пазам.

Конструкция рассматриваемой машины была такова, что на каждую фазу получался всего один виток. Следовательно, для того чтобы создать необходимую н. с., в машине по стержням обмотки должен был протекать очень большой ток при малом, естественно, напряжении на зажимах. Поэтому рядом с двигателем, на одной плите с ним устанавливался специальный трансформатор, понижавший напряжение сети и преобразовывавший число фаз тока в сторону их увеличения (о методах увеличения числа фаз см. ниже). Обмотка высшего напряжения трансформатора выполнялась с большим числом витков, а низшего представляла собой точно такие же стержни, как и у двигателя. Стержни трансформатора и двигателя соединялись соответственно друг с другом гибкими проводниками. Ротор двигателя выполнялся в виде обычной беличьей клетки¹. На том же рис. 5-1 показан продольный разрез машины. На рис. 5-2 та же машина показана в соединении с трансформатором; здесь же представлена схема поворотного переключателя для изменения направления вращения, предложенного М.О.Доливо-Добровольским.

¹ Рисунок заимствован нами из патентного описания. Как известно, в патентах подробно описывается существенно новый элемент. Этим объясняется то обстоятельство, что ротор двигателя, который не представляет ничего нового, изображен условно в явнополюсной форме. Во всех построенных Доливо-Добровольским машинах такого типа ротор имел нормальное исполнение с обмоткой в виде беличьей клетки.

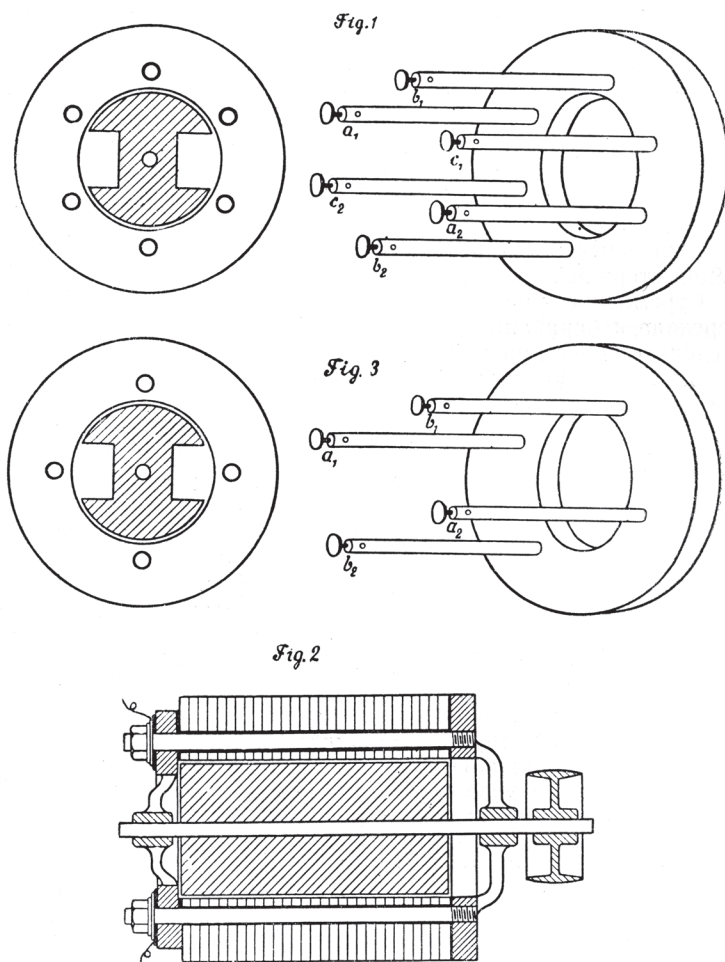


Рис. 5—1. Асинхронный двигатель со статорной обмоткой в виде болтов.

Серия двигателей с трансформаторами была спроектирована Доливо-Добровольским для г. Хейльбронна, небольшие заводы и мастерские которого снабжались энергией Лауфенской гидроэлектростанции. Эти двигатели отличались от описанных выше только тем, что имели большее число стержней, соединяемых на лобовых частях вилками (т. е. более типичную схему барабанной

обмотки), а трансформатор помещался в специальном корпусе, служившем одновременно фундаментной плитой для двигателя (рис. 5-3). Трансформатор понижал напряжение сети (110 в) до 10–20 в. В Хейльбронне в 1892 г. было установлено много таких двигателей мощностью от 0,35 до 7,5 квт.

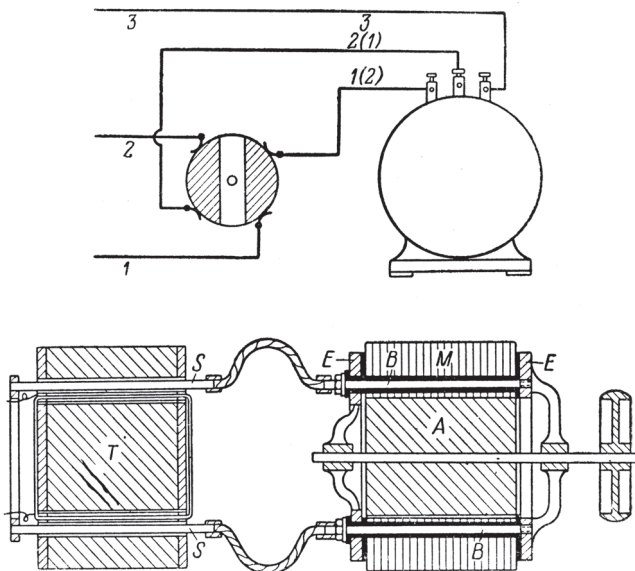


Рис. 5—2. Двигатель с трансформатором и поворотный переключатель. А — ротор; М — статор; В и S — стержни; Т — трансформатор; цифрами обозначен порядок следования фаз.

Конструкция двигателей была предельно проста, но необходимость снабжать каждый двигатель трансформатором значительно снижала их достоинства.

Применение двигателей было в какой-то мере объяснимо и экономически обосновано только до тех пор, пока не была найдена возможность значительно снизить рассеяние и уменьшить размеры машин с кольцевой обмоткой. Это удалось сделать некоторое время спустя инж. Арнольду, Бен-Эшенбургу и Кольбену, продолжившим после ухода Броуна из фирмы Эрликон тесное сотрудниче-

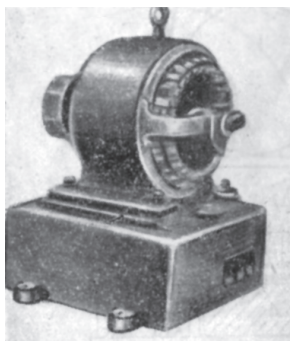


Рис. 5—3. Внешний вид двигателя с трансформатором.

ство с Доливо-Добровольским. Они уменьшили воздушный зазор до 0,5 мм и добились того, что кольцевая обмотка стала более приемлемой. Доливо-Добровольский тоже на некоторое время вернулся к кольцевой обмотке. Он спроектировал новую серию машин на большой диапазон мощностей. Эти машины с кольцевым статором получили очень широкое распространение и во многих странах работали до полного физического износа. Один такой двигатель с кольцевой обмоткой статора и с короткозамкнутым ротором на 4,5 квт, 110 в, 950 об/мин Доливо-Добровольский подарил Московскому политехническому музею, где он демонстрируется в действии до настоящего времени (рис. 5-4).

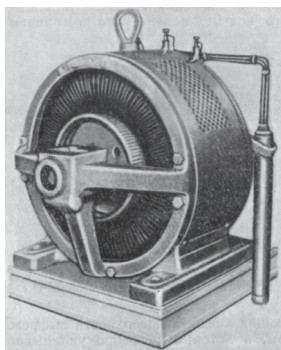


Рис. 5—4. Двигатель Доливо-Добровольского, подаренный Московскому политехническому музею.

В 90-х годах технология обмотки усовершенствовалась, и тогда окончательно вернулись к барабанному типу обмотки, настойчиво вводившемуся М.О.Доливо-Добровольским в практику конструирования машин трехфазного тока.

Выше мы познакомились с историей первого изобретения М.О.Доливо-Добровольского в области техники трехфазного тока — короткозамкнутого ротора с обмоткой в виде беличьей клетки. Простота конструкции «беличьей клетки», высокая механическая прочность и хорошие рабочие характеристики двигателей с короткозамкнутым ротором на небольшие мощности обеспечили этим двигателям очень широкое и быстрое распространение. Высказанные некоторыми теоретиками опасения в отношении невыгодного, якобы, распределения токов в такой «странный» обмотке, как «беличья клетка», были опровергнуты жизнью.

Хорошо понимая физические процессы в «беличьей клетке» и, в частности, принимая во внимание небольшую частоту перемагничивания сердечника ротора, М.О.Доливо-Добровольский, как мы видели выше, в первом же патенте указывал, что не является обязательным набирать сердечник ротора из штампованных листов стали, а медные стержни не нуждаются в особой изоляции. Однако в первых образцах асинхронных двигателей, используя технологию производства машин постоянного тока, М.О.Доливо-Добровольский применил ротор, набранный из отдельных штампованных листов. Стержни обмотки ротора в этих двигателях во избежание возможных вибраций их в пазах были изолированы бумагой. Такое конструктивное выполнение ротора создало в электротехнических кругах убеждение, что шихтовка ротора и изолирование стержней являются обязательными. Больше того, как сообщает Доливо-Добровольский, даже некоторые известные ученые объявили, что массивный ротор с неизолированными стержнями просто не может быть использован для промышленных двигателей.

Такое положение заставило Доливо-Добровольского проверить еще раз свои первоначальные выводы и выступить 2 июня 1896 г. в Берлинском электротехническом обществе со специальным сооб-

щением: «О якоре из массивного железа для трехфазных электродвигателей» [Л. 24]. Он сообщил, что по совету проф. Киттлера он для одной и той же машины мощностью примерно 7,5 кВт изготовил два ротора одинаковых размеров, но один из них был шихтованным с изолированными стержнями, а другой — массивным с неизолированными стержнями. Тщательные испытания дали почти полное совпадение результатов. Во втором случае было отмечено лишь некоторое снижение коэффициента мощности, который тем не менее оставался еще выше 0,8.

В результате проведенного исследования была создана простая конструкция массивного ротора (рис. 5-5). Стержень ротора отливался в виде массивного чугунного ременного шкива. Этот «шкив» закреплялся на валу при помощи стяжного анкерного кольца, надеваемого в горячем состоянии. Вдоль образующих внешней поверхности выфрезеровывались открытые пазы, в которые на ребро укладывались прямоугольные медные стержни. Понятно, что при такой конструкции, когда стержни уложены на ребро и соединены на лобовых частях массивными кольцами, были безопасны центробежные усилия, приложенные к стержням, и последние не нуждались в дополнительных креплениях. Механическая прочность, надежность в эксплуатации, легкость ремонта и сравнительная простота конструкции позволили фирме АЭГ начать широкое производство машин с таким ротором. Усложнение технологии, вызванное необходимостью фрезерования пазов, в значительной степени компенсировалось простотой других технологических операций: отливки, укладки стержней. При проекти-

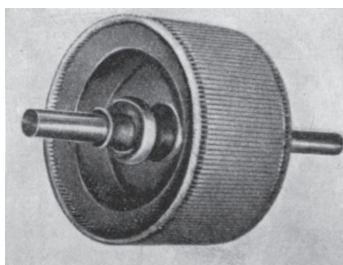


Рис. 5—5. Массивный ротор с короткозамкнутой обмоткой.



М. О. Доливо-Добровольский.

ровании машин с массивным ротором, замечает Доливо-Добровольский, следует учитывать токи, индуцируемые в стальном сердечнике ротора.

В процессе дальнейшего развития электромашиностроения снова оказалось более экономичным набирать ротор из штампованных листов стали, поскольку технология штамповки в массовом производстве была доведена до высокой степени совершенства. Но нельзя считать, что приведенные выше соображения и указания Доливо-Добровольского оказались неплодотворными. Они нашли свое развитие в дальнейшем в двух направлениях. Во-первых, стало общепризнанным, что для стержней беличьей клетки изоляция совершенно не является обязательной, и свидетельством этому является современное изготовление роторов с беличьей клеткой, в особенности путем заливки пазов ротора алюминием. Во-вторых, в некоторых более поздних работах (К.И. Шенфер, И.С. Брук и др.) нашли свое отражение и дальнейшее развитие идеи Доливо-Добровольского о применении массивного ротора. Однако в последнем случае совершенно устраняется обмотка, и расчет ведется целиком на токи, индуцируемые в поверхностном слое ротора.

В гл. 3, когда речь шла об изобретении асинхронного двигателя с фазным ротором, мы отмечали, что Доливо-Добровольский и его современники считали существенным недостатком такого рода двигателя наличие скользящих контактов. Но, с другой стороны, при наличии маломощных генераторных станций верхний допустимый предел мощности двигателей с короткозамкнутым ротором был очень низок. Известно, что при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором пусковой ток в несколько раз может превышать номинальный. Это в сетях небольшой мощности приводит к резким изменениям напряжения и отражается на работе других потребителей. Если при работе малых машин вопрос о величине начального пускового тока не играет большой роли, то в случае применения машин мощностью свыше 2–3 квт как условия работы сети, так и конструкция обмотки ротора самого двигателя приобретают первостепенное значение.

М. О. Доливо-Добровольского долго занимал вопрос усовершенствования методов пуска асинхронных двигателей. Он настойчиво искал возможность применения в сетях сравнительно небольшой мощности более или менее крупных двигателей без контактных колец, т. е. с короткозамкнутым ротором.

Наконец, в 1892 г. были найдены сразу два пути решения вопроса. Первый путь – это изобретение автотрансформаторного пуска асинхронного двигателя. Соответствующие патенты (германский № 75361 и швейцарский № 7476) были заявлены в 1893 г., а 28 февраля 1893 г. Доливо-Добровольский сообщил сведения о двигателях, запускаемых при помощи автотрансформатора, в заседании Электротехнического общества [Л. 15].

На рис. 5-6 приведены основные схемы из указанных патентов. На схеме 1 изображены двигатель и трехфазный автотрансформатор. Обмотки стержней автотрансформатора соединены в звезду и включаются в сеть. По виткам обмоток могла бы перемещаться траверса с пружинными контактами, соединенными с обмотками статора двигателя. При пуске двигателя было бы достаточно переместить траверсу из нижнего положения, когда напряжение равно

нулю, в верхнее. Однако в практических конструкциях для того, чтобы не делать оголенными витки обмоток автотрансформатора, предлагается делать отводы от соответствующих витков и соединять их с рычажным переключателем по схеме 1. Скользящий контакт переключателя должен одновременно перекрывать не менее двух зажимов с тем, чтобы избежать разрывов цепи тока. Но при этом в замыкаемых накоротко витках автотрансформатора индуктируются большие токи. Для уменьшения этих токов могут быть использованы добавочные сопротивления, вводимые в цепь коммутируемых витков по схеме 2. Для той же цели можно выполнить скользящий контакт из двух изолированных друг от друга пластин, между которыми включить либо омическое сопротивление, либо катушку со сталью.

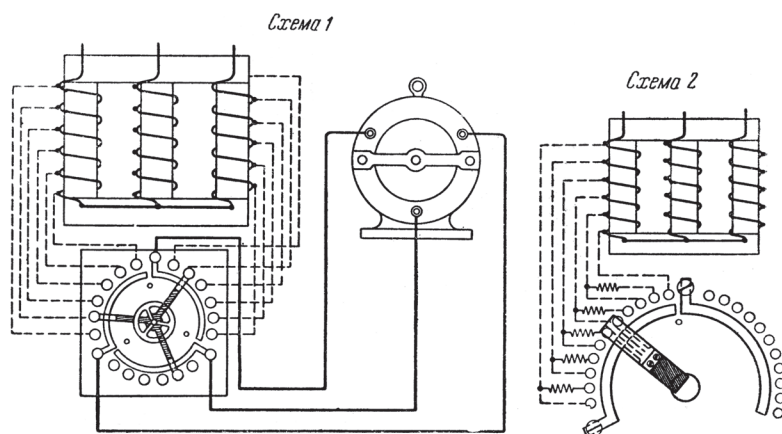


Рис. 5—6. Автотрансформаторный пуск асинхронного двигателя.

Фирма АЭГ стала изготовлять сравнительно крупные асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами (рис. 5-7). Так, в своем сообщении в Электротехническом обществе Доливо-Добровольский в качестве примера назвал двигатель мощностью 40 квт, 110 в, 725 об/мин, 50 гц. Вес этого двигателя составлял 1 200 кг, к. п. д. — 91 %. Доливо-Добровольский отмечал, что при номинальном токе

280 а двигатель во время пуска потреблял ток 400 а, следовательно, кратность пускового тока составляла всего $\frac{I_n}{I_n} = \frac{400}{280} = 1.43$. Этот двигатель экспонировался в 1893 г. на Международной электротехнической выставке в Чикаго и вызывал удивление инженеров фирмы Вестингауз, демонстрировавших в соседнем зале двухфазные двигатели Тесла – Скотта.

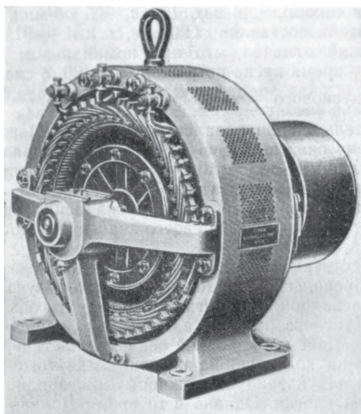


Рис. 5–7. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Автотрансформаторный метод пуска асинхронных двигателей не потерял полностью своего значения и до настоящего времени.

Непосредственно вслед за рассмотренным изобретением Доливо-Добровольский нашел второй путь улучшения условий пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. На этот раз решение задачи было найдено в изобретении так называемой «двойной беличьей клетки». Еще в первом патенте на конструкцию короткозамкнутого ротора (см. рис. 3-1) была указана возможность многорядного исполнения беличьей клетки. Однако в то время Доливо-Добровольский не придавал этому никакого значения с точки зрения улучшения пусковых свойств. Этот вопрос тогда еще не стоял. Единственным его стремлением при многорядном исполнении беличьей клетки являлось уменьшение сопротивления обмотки рото-

ра. Строго говоря, если бы Доливо-Добровольский построил в то время двигатели с двойной клеткой, состоящей из стержней равного сопротивления, даже более того, если бы внешняя клетка (как это видно из чертежа) имела большее сечение стержней, т. е. меньшее сопротивление, то и в этом случае общее сопротивление обмотки ротора в момент пуска увеличивалось бы благодаря известному эффекту вытеснения тока при частоте сети. Однако в то время он этого, вероятно, не заметил.

Но то, что еще не было выяснено в 1889 г., стало согласно утверждению Доливо-Добровольского совершенно ясным для него в 1892 [Л. 38 и 48]. Позднее, в 1918 г., когда в печати начали появляться сведения о двигателях с двойной беличьей клеткой, предложенной еще в 1898 г. Б у ш е р о, Доливо-Добровольский выступил в защиту своего приоритета. В письме, направленном в редакцию журнала «ETZ», он писал между прочим, следующее:

«...Расположение двух беличьих клеток на различной глубине в железе ротора асинхронных двигателей трехфазного тока приписывается г. Бушеро. Это неверно. Такой ротор был построен мной у АЭГ еще в 1892 г. и изготовлялся в больших количествах. Еще сегодня несколько типов таких электродвигателей работает в некоторых цехах. Я сошлюсь на «ETZ», 1893, где на стр. 183 на рисунках 13 и 14 изображены такие двигатели (см. рис. 5-8). Там весьма отчетливо видны две беличьи клетки, о которых идет речь. Правда,

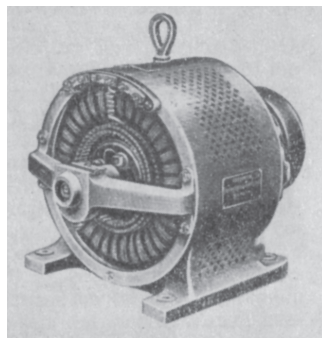
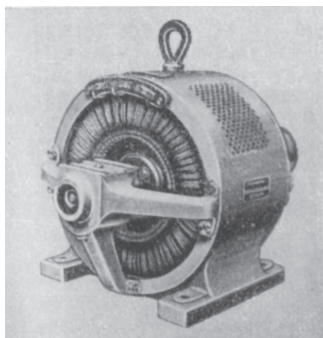


Рис. 5—8. Внешний вид асинхронных двигателей с двойной беличьей клеткой.

тогда не было сделано никакого указания на пусковое действие этого устройства, но причиной этому была существовавшая в то время конкуренция» [Л. 38].

В том же письме Доливо-Добровольский указывал, что он сознательно изготовлял ротор таким образом, что внешняя обмотка имела большее сопротивление, чем внутренняя, что он нашел оптимальное соотношение между величинами указанных сопротивлений, в результате чего удавалось значительно улучшить пусковые свойства двигателя при незначительном снижении коэффициента мощности.

В литературе есть сведения [Л. 158], что М.О.Доливо-Добровольский строил двигатели с роторами, которые называли ступенчатыми (Stufenanker). Эти роторы имели своеобразные двойные клетки: одна из обмоток, обладавшая большим сопротивлением, была пусковой, а другая – рабочей. При достижении ротором необходимой скорости при помощи специального встроенного рычажного переключателя первая клетка выключалась, а вторая – включалась. На рис. 5-9 представлена записка М.О.Доливо-Добровольского, в которой он дает описание опытного экземпляра ступенчатого якоря. Впоследствии идеи Доливо-Добровольского получили свое развитие в различных конструкциях роторов с двойной клеткой, с глубоким и клиновидным пазами.

В 90-х годах прошлого столетия и позднее двигатели, имеющие ротор с двойной беличьей клеткой, не получили заметного распространения. Завод АЭГ очень быстро прекратил их выпуск, да и сам Доливо-Добровольский не сумел на этот раз по достоинству оценить свое изобретение и считал его мелким эпизодом в истории техники трехфазного тока. Он не нашел нужным упомянуть о нем даже в своей работе, посвященной истории трехфазного тока [Л. 37]. И только тогда, когда в печати стали настойчиво подчеркиваться заслуги Бушера, который придал двигателю с двумя беличьими клетками окончательное оформление как двигателю со специальными пусковыми характеристиками, Доливо-Добровольский обратился в редакцию журнала с разъяснениями по этому вопросу. В 20-х годах текущего столетия двигатели, роторы которых имеют двойную беличью клетку,

начали получать все большее распространение и широко применяются в настоящее время.

Весьма интересна история одного из изобретений М.О.Доливо-Добровольского, касающегося схемы однофазного питания трехфазного электродвигателя. В середине 90-х годов еще не были оставлены попытки найти удовлетворительные способы сохранить построенные ранее сети однофазного тока. Иначе говоря, не были оставлены

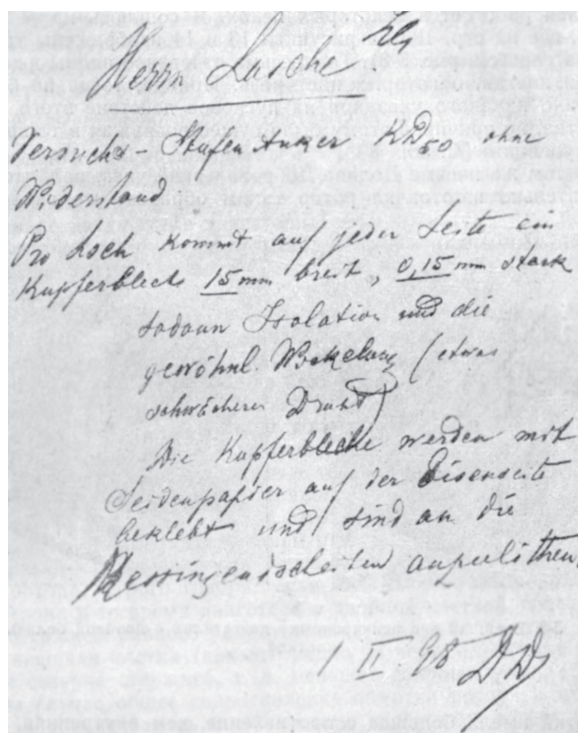


Рис. 5—9. Записка М.О.Доливо-Добровольского по поводу изготовления опытного экземпляра „ступенчатого якоря“.

Перевод: Господину Лайхе. Опытный ступенчатый якорь без сопро-
 тивления: по боковым сторонам каждого паза медная пластинка
 шириной 15 мм, толщиной 0,15 мм. Затем — изоляция и обычная
 обмотка (тонкая проволока). Обращенные к железу стороны медных
 пластинок оклеиваются тонкой бумагой и торцовые их части
 припаиваются к латунным кольцам. I, II-98. Д-Д.

попытки построить промышленные однофазные двигатели. Понятно, что речь могла идти, как правило, о двигателях с искусственной фазой. Общее отличие этих работ от прежних, проводившихся до 1891 г., состояло в том, что теперь уже ни у кого не возникала мысль о «вытеснении» трехфазного тока. В этой связи интересно отметить, что, когда в 1897 г. известный специалист по теории электрических машин, один из первых авторов круговой диаграммы асинхронного двигателя А.Гейланд предложил конструкцию однофазного двигателя (4 л. с., к. п. д. — 74 %, $\cos \phi = 0,77$), Доливо-Добровольский по этому поводу заметил: «Когда в свое время выступил многофазный ток, то он должен был выдержать борьбу против однофазного переменного тока. Тогда почти не имелось двигателей переменного тока, но нужно было все же доказать преимущества многофазных двигателей для того, чтобы они внушили к себе уважение. Ныне обстоятельства изменились: теперь двигатель однофазного тока, если он выходит на сцену, должен бороться против трехфазного двигателя, ибо последний уже получил права гражданства и применяется тысячами» [Л. 159]. При этом Доливо-Добровольский указал, что трехфазный двигатель той же мощности имеет к. п. д. в среднем 85 %, а $\cos \phi = 0,86 - 0,90$.

Активизация поисков путей использования однофазных сетей объяснялась еще и тем обстоятельством, что патентноправовые нормы давали преимущества фирмам-владелицам патентов или лицензий и сковывали возможности других фирм. Указанные причины вызвали появление в середине 90-х годов многих схем питания многофазных двигателей однофазным током. В схемах Штейнметца, в многочисленных конструкциях конденсаторных двигателей воскрешались и совершенствовались работы Тесла, Броуна, Ютена и Леблана.

Одним из первых схему однофазного питания трехфазного двигателя дал М.О.Доливо-Добровольский. Он выступил в июле 1897 г. на годовом собрании Союза германских электротехников в дискуссии по докладу Г.Гергеса, в котором была показана возможность пуска двухфазного двигателя в сети однофазного тока.

Доливо-Добровольский сообщил, что некоторое время тому назад он нашел способ питания трехфазного двигателя однофазным током и при этом таким образом, что распределение токов в обмотках двигателя практически такое же, как если бы двигатель был включен в сеть трехфазного тока [Л. 160]. Указанного результата ему удалось добиться, подобрав соответствующим образом и включив по схеме рис. 5-10 активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X . Доливо-Добровольский сообщил, что ему удалось питать по такой схеме нормальный трехфазный двигатель, и при этом фазные напряжения и токи были соответственно практически равны друг другу. Этот двигатель имел контактные кольца и пусковое сопротивление в цепи ротора, а регулирование фаз осуществлялось для определенного положения пускового реостата. Двигатель имел значительный пусковой момент.

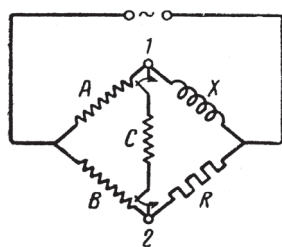


Рис. 5—10. *Схема однофазного питания трехфазного двигателя.*

В качестве серьезного недостатка такой схемы Доливо-Добровольский справедливо указал значительные потери в дополнительных активном и индуктивном сопротивлениях и считал, что эта схема представляет только теоретический интерес.

М. О. Доливо-Добровольский занимался конструированием не только электродвигателей, но и генераторов. Как до 1891 г., так и позднее он проектировал синхронные генераторы различной мощности. Но особое место в его работах после 1891 г. занимали получившие в 90-х годах заметное распространение генераторы индукторного типа.

Индукторные генераторы в принципе были известны задолго до работ Доливо-Добровольского. По-видимому, впервые такую машину построил Найт еще в 1854 г. [Л. 161]. Интересную конструкцию индукторного генератора предложил в 1877 г. П.Н.Яблочков (французский патент № 119702). В его машине (рис. 5-11) между двумя вращающимися стальными зубчатыми дисками M укреплялась неподвижно катушка возбуждения b . Эти диски были окружены рамками AB и CD с индуктируемыми обмотками. Попеременно проходя мимо соответствующих выступов этих рамок, зубцы индуктора изменяли проводимость магнитной цепи, т. е. изменяли величину магнитного потока, проходившего по раме с обмоткой.

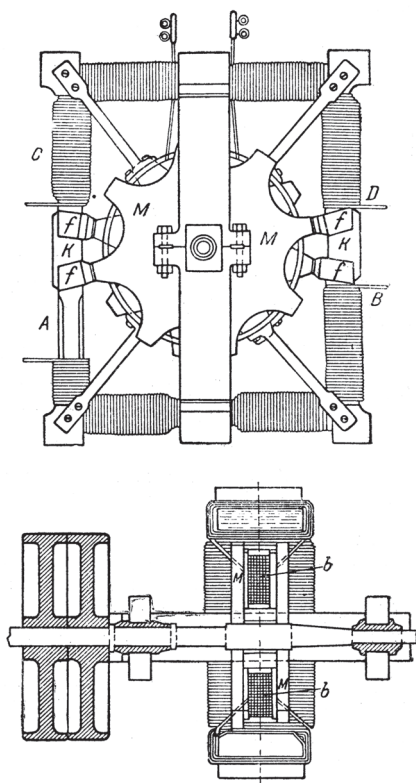


Рис. 5—11. Индукторный генератор П.Н.Яблочкова.

В 1883 г. на Венской электротехнической выставке демонстрировалась в действии машина русского изобретателя А.Клименко из г. Харькова. Это был индукторный генератор с неподвижными обмотками. Между двумя вращающимися со скоростью 1 000 *об/мин* крестовинами укреплялась неподвижно катушка возбуждения, а по периферии машины были расположены индуцируемые обмотки, намотанные на набранные из стальных полос сердечники. На выставке машина питала восемь последовательно соединенных свечей Яблочкова. Клименко сконструировал свою машину в 1882 г., а русскую привилегию № 3085 получил в 1885 г. Схема машины Клименко представлена на рис. 5-12, где *а* – крестовина индуктора; *б* – обмотка возбуждения; *в* – сердечники и *г* – индуцируемая обмотка. Достоинством машин Яблочкова и Клименко было устройство в них неподвижных обмоток, а следовательно, отсутствие трущихся контактов.

В конце 80-х годов машину индукторного типа построил известный английский электрик Мордей, но в его машине указанное выше преимущество было потеряно, так как обмотка возбуждения вращалась вместе с ротором. На недостатки этой машины и на то, что русский изобретатель Клименко построил машину, основанную на том же принципе, раньше Мордея, Доливо-Добровольский указал в своем докладе в Электротехническом обществе 22 января 1895 г. [Л. 20].

В 90-х годах прошлого столетия основными первичными двигателями, устанавливавшимися на электростанциях, были поршневые паровые машины и водяные турбины. Паровые турбины были

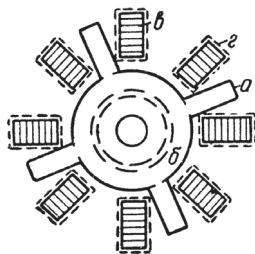


Рис. 5—12. Схематический вид индукторного генератора Клименко.

еще новинкой. В связи с этим скорости, на которые должны были проектироваться генераторы, были низкими. Это в свою очередь приводило к необходимости строить генераторы с большим числом полюсов, расход активных материалов, при этом увеличивался, а следовательно, увеличивались и потери в них. Так, при обычной тогда скорости 150 об/мин и частоте 50 гц требовалось $\frac{60 \cdot 50}{150} = 20$ пар полюсов. Не случайно поэтому Броун в первом мощном синхронном генераторе в Лауфене устроил возбуждение от одной катушки, хотя конструктивно выполнил это не совсем удачно. И не случайно, конечно, за разработку индукторных генераторов взялся в 1894 г. М.О.Доливо-Добровольский. Индукторные генераторы явились временной мерой, необходимой на соответствующем этапе электромашиностроения.

На рис. 5-13 схематически изображен процесс наведения э. д. с. в индуктируемой обмотке при вращении индуктора (виток обмотки перемещается из положения 1 в положение 5). Можно подобрать такой закон изменения магнитной проводимости, что в обмотке будет наводиться синусоидальная э. д. с., когда поток изменяется от $\Phi_{\text{макс}}$ до $\Phi_{\text{мин}}$. Но изменение потока в пределах $\Phi_{\text{макс}} - \Phi_{\text{мин}}$ а не $(-\Phi_{\text{макс}}) - (+\Phi_{\text{макс}})$ заставляет увеличивать размеры машины, и с этим приходится мириться. Существенное достоинство индукторного генератора состоит в том, что частота тока зависит от числа зубцов индуктора Z_u , которое практически может быть взято произвольным. При соответствующем выборе Z_u можно спроектировать машину на любую потребную скорость $n = \frac{60f}{Z_u}$.

Доливо-Добровольский построил несколько типов индукторных генераторов, одни из которых были предназначены для повышенных скоростей (но не высоких), а другие — для низких скоростей.

Два типа генераторов повышенной скорости представлены в разрезе на рис. 5-14. В этих машинах катушка возбуждения *В* закреплялась неподвижно в ярме *М*. Вращающийся индуктор *Б* (отдельно

изображен на рис. 5-15) изменял магнитную проводимость в машине; в обмотке K , размещенной на шихтованных зубцах A , наводилась э. д. с. Трехфазные генераторы этого типа фирма АЭГ выполняла на мощности до 100 квт.

Индукторные генераторы могли выполняться как для трехфазного, так и для однофазного токов. В трехфазном исполнении число

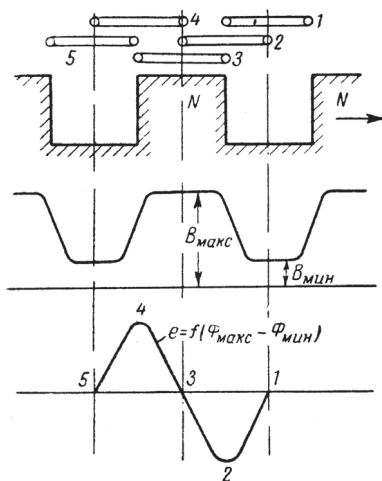


Рис. 5—13. Индукция и э. д. с. в индукторном генераторе.

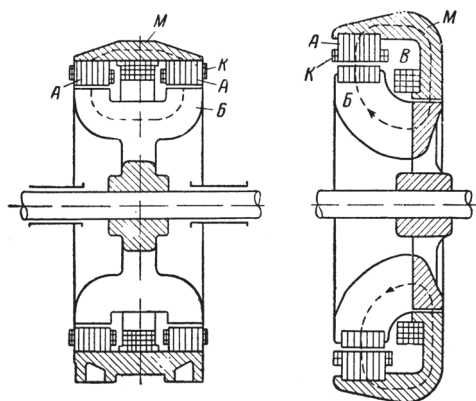


Рис. 5—14. Индукторные генераторы.

катушек K (и зубцов A) было втрое больше числа зубцов индуктора. Для больших машин обмотка выполнялась также стержневой (три такие машины мощностью по 220 *квт* были изготовлены фирмой АЭГ еще в 1894 г).

Генераторы, рассчитанные на непосредственное соединение с валом паровой машины, имели большой диаметр и малую длину. Разрез такой машины представлен на рис. 5-16, где обозначено: M – ярмо; A – зубцы; B – обмотка возбуждения; K – индуктируемая обмотка; Γ – выступы индуктора, укрепленные на маховом колесе паровой машины Π .

Первые трехфазные генераторы АЭГ последнего типа были установлены на городской электростанции в г. Страсбурге: три машины по 280 *квт* и две машины по 140 *квт*. Пять трехфазных генераторов были установлены в 1896 г. на заводе Струве в Коломне (Россия).

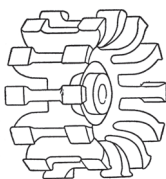


Рис. 5—15. Индуктор.

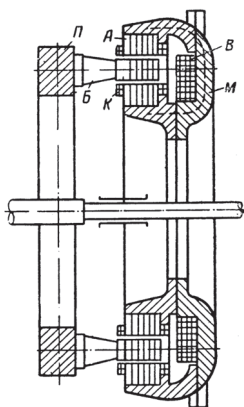


Рис. 5—16. Индукторный генератор.

Доливо-Добровольский отмечал следующие достоинства индукторных машин. Во-первых, возможность получения стандартной частоты при низких скоростях; во-вторых, чрезвычайная простота конструкции, и, следовательно, простота разборки машины при ремонте; в-третьих, отсутствие скользящих контактов, следовательно, и крайняя простота ухода; в-четвертых, малые затраты меди на обмотку возбуждения и сравнительно малая мощность возбуждения и, наконец, малое падение напряжения в индуктируемой обмотке, поскольку конструкция машины позволяет получать большую величину магнитного потока, а следовательно, число витков индуктируемой обмотки можно уменьшить. Кроме того, в индукторных генераторах потери на гистерезис невелики, так как магнитный поток не меняет знака.

Для машины мощностью 280 *квт*, установленной в Страсбурге, Доливо-Добровольский приводит следующие данные:

мощность — 280 *квт* при линейном напряжении 2 750 *в*;
 скорость вращения — 150 *об/мин*;
 число зубцов индуктора — 20;
 вес меди катушки возбуждения — 730 *кг*;
 вес меди основной обмотки — 200 *кг*;
 потери на возбуждение — 4 *квт* (1,43 % от мощности машины);
 потери в индуктируемой обмотке — 2 %;
 общий вес стали (без вала и подшипников) — 8 750 *кг*.

Коэффициент полезного действия индукторных генераторов АЭГ доходил до 94 %.

Индукторные генераторы в конце 90-х годов получили значительное распространение. Вслед за АЭГ их стали строить фирмы Эрликон и Броун-Бовери в Швейцарии, завод Кайля в Париже, фирма Стенли и Келли в Англии и др. В России индукторные генераторы проектировал инженер И. Сольман, работавший на заводе «Павел Валь и К°» в Выборге [Л. 162]. Теоретическими исследованиями этих машин занимался Б. И. Угримов, который, между прочим, писал: «Особые преимущества этих машин, обеспечивающие отсутствие

порчи, весьма ценны для России, где починка динамомашин обходится очень дорого»... и далее: «Громкая популярность этих генераторов, которую они приобрели за короткое время на западе, и тот факт, что их начало строить большинство известных заводов, ставят эти динамомшины в разряд первоклассных по простоте, солидности конструкции и высокому полезному действию»... [Л. 163].

Индукторные генераторы не потеряли своего значения и до настоящего времени в некоторых специальных областях электротехники. Но задачи, стоящие ныне перед этими машинами, противоположны по своему характеру причинам, вызвавшим их появление в 90-х годах прошлого века. Если в то время индукторные генераторы должны были при низких скоростях обеспечить генерирование тока стандартной промышленной частоты, то теперь эти генераторы должны при нормальных и сравнительно высоких скоростях (до 3 000 об/мин) дать повышенную и высокую частоту. Так, индукторные генераторы получили распространение в самолетных двигатель-генераторных установках для преобразования постоянного тока бортовой сети в переменный с частотой 400 и 800 *Гц*. Индукторные генераторы сначала для питания звучащих радиостанций, а затем для высокочастотной обработки металлов строил с 1907 г. академик В.П. Вологдин. Индукторные генераторы находят себе применение также в лабораторной практике для генерирования тока, необходимого при испытаниях механических свойств материалов, для испытания изоляции секций обмоток электрических машин, в измерительной практике, в химической промышленности и т. д. Так, до сегодняшних дней живет еще один из типов электрических машин, существенную роль в начальном развитии которых сыграл М.О. Доливо-Добровольский.

Около 1900 г. появилось много работ различных авторов, посвященных вопросу компаундирования синхронных генераторов. Мысль использовать так или иначе рабочий ток машины, для того чтобы воздействовать им на возбуждение той же машины, как это имело место в компаундных машинах постоянного тока, представлялась весьма заманчивой.

Так, например, Леблан и Штейнметц часть рабочего тока преобразовывали в постоянный ток при помощи одноякорных преобразователей, что, конечно, оказывалось слишком дорогим, а степень точности регулирования напряжения существенно зависела от коэффициента мощности нагрузки. Несколько позднее появились работы Гейланда, Александерсона, фирмы Вестингауз и др. На этот раз предлагалось преобразовывать переменный ток в постоянный при помощи синхронного коммутатора (механического преобразователя). В этом случае имели место не только значительные потери, но и возникала трудность получения безыскровой работы коммутатора. Арнольду, Бушери, Даниэльсону, Леблану и др. удалось несколько улучшить коммутацию. Встречались также попытки воздействовать переменным током на перемещения движка реостата в цепи возбуждения (Блати, Кеннеди, Тюри и др.).

Только перечень направлений и лиц, занимавшихся проблемой компаундирования синхронных машин, показывает, насколько эта задача представлялась интересной и сложной. Правильное, соответствующее современным нашим взглядам направление в решении указанной проблемы нашел М.О.Доливо-Добровольский [Л. 63].

Еще в 1887 г. было указано на возможность использования униполярных элементов для выпрямления переменного тока и осуществления самовозбуждения машины [Л. Майхе, германский патент № 46075]. Доливо-Добровольский понял, что решение проблемы компаундирования синхронных машин может быть найдено только при использовании статических выпрямителей. В то время были известны алюминиевые униполярные элементы¹. Однако они были маломощными и имели очень низкий к. п. д. Идея Доливо-Добровольского состояла в следующем: выпрямлять при помощи униполярных элементов не весь ток, потребный для возбуждения, а лишь ту часть

¹ Распространенным выпрямительным устройством в то время являлся элемент, состоявший из алюминиевого и свинцового электродов, погруженных в раствор двууглекислой соды. Изобретатель этого выпрямителя ГРЕТЦ помещал электроды в раствор серной кислоты.

его, которая необходима для компенсации падения напряжения в машине при увеличении нагрузки. В этом случае требуется выпрямитель значительно меньшей мощности. Но схему можно сделать еще более экономичной, если воздействовать на возбуждение возбудителя. Конкретная разработка этой идеи нашла свое выражение в германском патенте Доливо-Добровольского № 148074 от 23 ноября 1902 г.

В патентном описании указаны различные схемы компаундирования однофазных и трехфазных синхронных машин. При этом предусматривается как применение дополнительной компаундной обмотки, так и включение компаундирования последовательно с обмоткой возбуждения (и то и другое как в цепи возбуждения генератора, так и в цепи возбуждения возбудителя). На рис. 5-17 представлена в качестве примера схема компаундирования трехфазного генератора с последовательным включением компаундирования в цепь возбуждения возбудителя. Было предусмотрено также применение двухполупериодного выпрямления тока, что для однофазной машины показано на рис. 5-18 (обозначения те же, что и для предыдущей схемы).

М. О. Доливо-Добровольский справедливо отмечал, что включение компаундирования в цепь возбуждения возбудителя заметно увеличивает инерционность схемы. Но этот недостаток компенсировался тем, что при такой схеме значительно снижается нагрузка на выпрямитель. Например, для генератора мощностью 1 000 *квт* требуется возбудитель мощностью примерно 15 *квт*, что составляет 1,5 % мощности генератора. Для возбуждения возбудителя нужно затратить мощность, составляющую примерно 7 % мощности возбудителя, т. е. примерно 1 *квт*. Мощность возбуждения при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной может меняться примерно в отношении 1 : 2, следовательно, при холостом ходе генератора на возбуждение возбудителя потребляется 0,5 *квт*. В таком случае вентильные элементы должны быть рассчитаны на мощность, равную 0,5 *квт*, что составляет лишь 0,05 % мощности синхронного генератора. Отсюда следует, что при подсчете экономического эффекта к. п. д. выпрямителя может вообще не приниматься во внимание. В следующем своем патенте (германский патент № 145446 от

5 декабря 1902 г.) Доливо-Добровольский описывает схемы компаундирования самовозбуждающихся однофазных и многофазных синхронных генераторов¹.

На рис. 5-19 представлена схема компаундирования однофазного самовозбуждающегося генератора. В известных уже к тому времени схемах самовозбуждения синхронных генераторов ком-

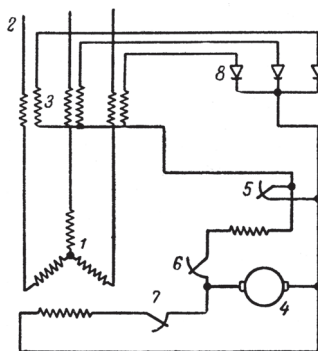


Рис. 5—17. Схема компаундирования трехфазного генератора.
1 — синхронный генератор; 2 — линия; 3 — трансформаторы тока; 4 — возбудитель; 5, 6, 7 — регулировочные реостаты; 8 — комплект вентильных элементов.

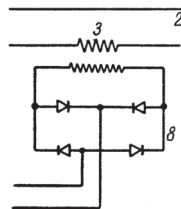


Рис. 5—18. Схема двухполупериодного выпрямления.

¹ Оба рассматриваемых патента взяты на имя фирмы, поэтому авторство Доливо-Добровольского устанавливается косвенно: на работы Доливо-Добровольского, описанные в первом патенте, указывает Зайднер [Л. 164, 165], а существо второго патента близко к содержанию первого, и, кроме того, фирма АЭГ имеет всего два указанных патента по схемам компаундирования синхронных машин, относящихся к интересующему нас периоду (следующий патент этого класса был взят фирмой лишь в 1906 г. и по содержанию не имеет ничего общего с рассматриваемыми).

паундирование осуществлялось путем включения дополнительного трансформатора тока 4 («фазовая» схема компаундирования). Но при этом более или менее точное регулирование достигается лишь выше определенной нагрузки. Ниже этого предела, т. е. при малых нагрузках, регулирование нарушается. Причиной является то обстоятельство, что при нагрузках, близких к холостому ходу, вторичная обмотка трансформатора 4 вследствие ее самоиндукции, представляет большое сопротивление для тока возбуждения. Изобретение Доливо-Добровольского состояло в том, что он устранил этот дефект, включив последовательно с вторичными обмотками трансформаторов конденсатор 8. Емкостное сопротивление этого конденсатора выбиралось равным индуктивному сопротивлению вторичной обмотки трансформатора 4. Благодаря этому даже при холостом ходе тока вторичной обмотки трансформатора 3 противостоит практически лишь омическое сопротивление вторичной обмотки трансформатора 4, которое слишком мало, чтобы принимать его во внимание.

Компаундирование синхронных генераторов не получило в то время практического применения. Это объясняется двумя основны-

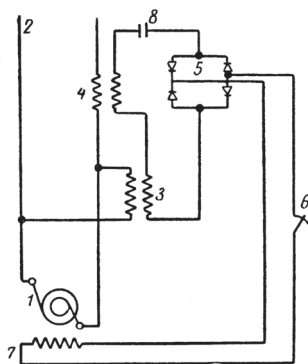


Рис. 5—19. Схема компаундирования самовозбуждающегося синхронного генератора.

1 — генератор; 2 — линия; 3 — трансформатор напряжения;
4 — трансформатор тока; 5 — комплект вентильных элементов;
6 — регулировочный реостат; 7 — обмотка возбуждения; 8 — конденсатор.

ми причинами. Во-первых, было найдено, что поддерживать напряжение генератора при изменениях нагрузки значительно надежнее и точнее можно при помощи автоматических регуляторов напряжения. Во-вторых, вентильные устройства в то время были весьма несовершенны. Появление более мощных купроксных и селеновых выпрямителей, а также изучение вопросов повышения устойчивости энергетических систем снова выдвинули около 1940 г. проблему компаундирования синхронных машин. Эта проблема была успешно решена группой советских ученых в Институте энергетики Академии наук Украинской ССР.

Так, спустя почти полвека, идеи, в развитии которых ближайшее участие принимал М.О.Доливо-Добровольский, были реализованы.

Разносторонняя деятельность нашего изобретателя коснулась также одноякорных вращающихся преобразователей. Этот тип преобразователей, как мы видели ранее, возник вместе с техникой многофазных токов. Схемы одноякорных преобразователей встречались в патентах Кёрпера, Бредли, Тесла. Первый свой трехфазный асинхронный двигатель Доливо-Добровольский питал током трехфазного вращающегося преобразователя. На электростанциях переменного тока вращающиеся одноякорные преобразователи заряжали аккумуляторные батареи, в цехах промышленных предприятий они снабжали постоянным током дуговые лампы, электролитические ванны и т. д. Исключительное применение одноякорные вращающиеся преобразователи получили на тяговых подстанциях. И хотя еще в конце 80-х — начале 90-х годов не были оставлены попытки использовать в качестве преобразователей различные механические выпрямители¹, решающее значение в области преобразовательной техники приобрели вращающиеся одноякорные преобразователи.

¹ Еще в 1887 г. Хазельвандер предлагал для «выпрямления» тока применять синхронный коммутатор—вращающееся со скоростью, соответствующей частоте переменного тока, устройство, подобное коллектору (см. гл. 2). В 1889 г. сложное устройство с двумя коммутаторами предлагал в Германии лейтенант Паттен [Л. 166], а в 1890 г. несколько отличное, но не менее сложное устройство предлагал доктор Фёппл [Л. 167].

Широко были представлены различные конструкции вращающихся одноякорных преобразователей на выставке во Франкфурте в 1891 г. Доливо-Добровольский, в частности, экспонировал там не только трехфазный, но и шестифазный преобразователи. Ему было хорошо известно, что увеличение числа фаз благоприятно сказывается на экономичности и ведет к уменьшению размеров машины. Были также хорошо известны преимущества одноякорного преобразователя перед двигатель-генераторной установкой: снижение веса (на 30–40 %), экономия места (до 50 %) и очень высокий к. п. д.¹ Но был также известен и принципиальный недостаток одноякорного преобразователя – жесткая связь между напряжениями на коллекторе и на кольцах. Следовательно, при заданном напряжении в сети переменного тока нельзя было получить произвольного напряжения на коллекторе преобразователя. Если к кольцам подводится стандартное напряжение, то на коллекторе напряжение будет нестандартным. Поэтому между кольцами преобразователя и сетью обычно включают трансформаторы. Но даже когда удастся получить необходимое напряжение на коллекторе, регулировать его величину, к сожалению, нельзя (если, конечно, трансформатор имеет постоянный коэффициент трансформации).

Стремясь устранить указанный недостаток, М.О.Доливо-Добровольский разработал в 1898 г. метод регулирования напряжения в широких пределах при помощи синхронных трехфазных машин добавочного напряжения [Л. 37]. Соответствующий германский патент № 112064 был заявлен в декабре 1898 г. На рис. 5-20 представлены чертежи из этого патента, где A – кольцевой якорь преобразователя, R – якорь машины добавочного напряжения, сидящий на одном валу с первым якорем, C – коллектор, S – кольца (на нижнем чертеже показана схема соединений обмоток якорей A и R). Очевидно, что если полюса машины добавочного напряжения расположить таким образом, чтобы в обмотках ее якоря наводились э. д. с.

¹ Современные одноякорные вращающиеся преобразователи вместе с трансформатором имеют к. п. д. до 93 %.

соответствующей фазы, то, изменяя возбуждение этой машины, можно в значительных пределах регулировать подводимое к преобразователю напряжение переменного тока. Такое устройство легко может быть компаундировано. Для этого достаточно на полюсах машины добавочного напряжения расположить соответствующее число витков, обтекаемых рабочим (постоянным) током. Указанное изобретение Доливо-Добровольского получило значительное распространение в начале текущего столетия. Однако в 20-х годах вращающиеся преобразователи начали вытесняться более мощным средством преобразовательной техники — статическими ионными преобразователями.

М. О. Доливо-Добровольский в начале своей работы в области техники трехфазного тока придавал излишне большое значение строгой равномерности нагрузки отдельных фаз и переоценивал

Fig. 1

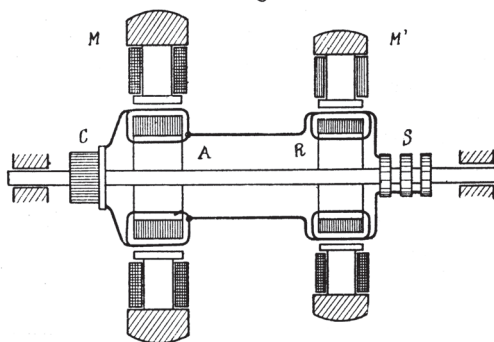


Fig. 2

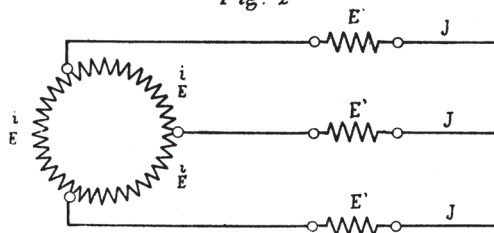


Рис. 5—20. Одноякорный преобразователь с машиной добавочного напряжения.

преимущества применения многофазных систем с числом фаз больше трех. Так, еще в 1890 г. он нашел способ соединить преимущества 6- или 12-фазных машин и трехпроводной линии передачи. Для этого, естественно, нужно было преобразовывать, например, шестифазную систему в трехфазную и наоборот. Эти изобретения были зафиксированы в германском патенте № 79528 (декабрь 1890 г.) и в английском патенте № 3191 (февраль 1891 г.).

В указанных патентах, пожалуй, наиболее ценным является описание способов соединений трансформаторов, позволяющих преобразовывать число фаз. Впоследствии такие трансформаторы получили широкое распространение в схемах питания одноякорных преобразователей.

На рис. 5-21 первая схема изображает трансформатор, состоящий из стального кольца g с расположенными на нем первичными катушками d и звездообразного сердечника f , на котором в свою очередь расположены вторичные катушки, соединенные в трехфазную звезду. На второй и третьей схемах показано соединение вторичных катушек в треугольник и звезду с выведенным нулевым проводом. На четвертой и пятой схемах изображены трансформаторы, в принципе представляющие собой заторможенные многофазные асинхронные двигатели. Наконец на шестой и седьмой схемах изображены соответственно трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости, и многофазная трансформаторная группа. Способы соединений обмоток всех трансформаторов ясны из чертежей.

Во всех приведенных схемах различными путями решается одна и та же задача: преобразование системы с данным числом фаз в систему с другим числом фаз. Для Доливо-Добровольского наибольшее значение имело преобразование m -фазной системы в трехфазную и наоборот, причем чаще всего m равно 6 или 12. Примером может служить схема рис. 5-22. Здесь генератор 1 имеет шесть фаз; каждая фаза в отдельности через реостат и амперметр подводится к трансформатору, который преобразовывает шестифазную систему в трехфазную. Это позволяет осуществлять передачу энергии только по трем

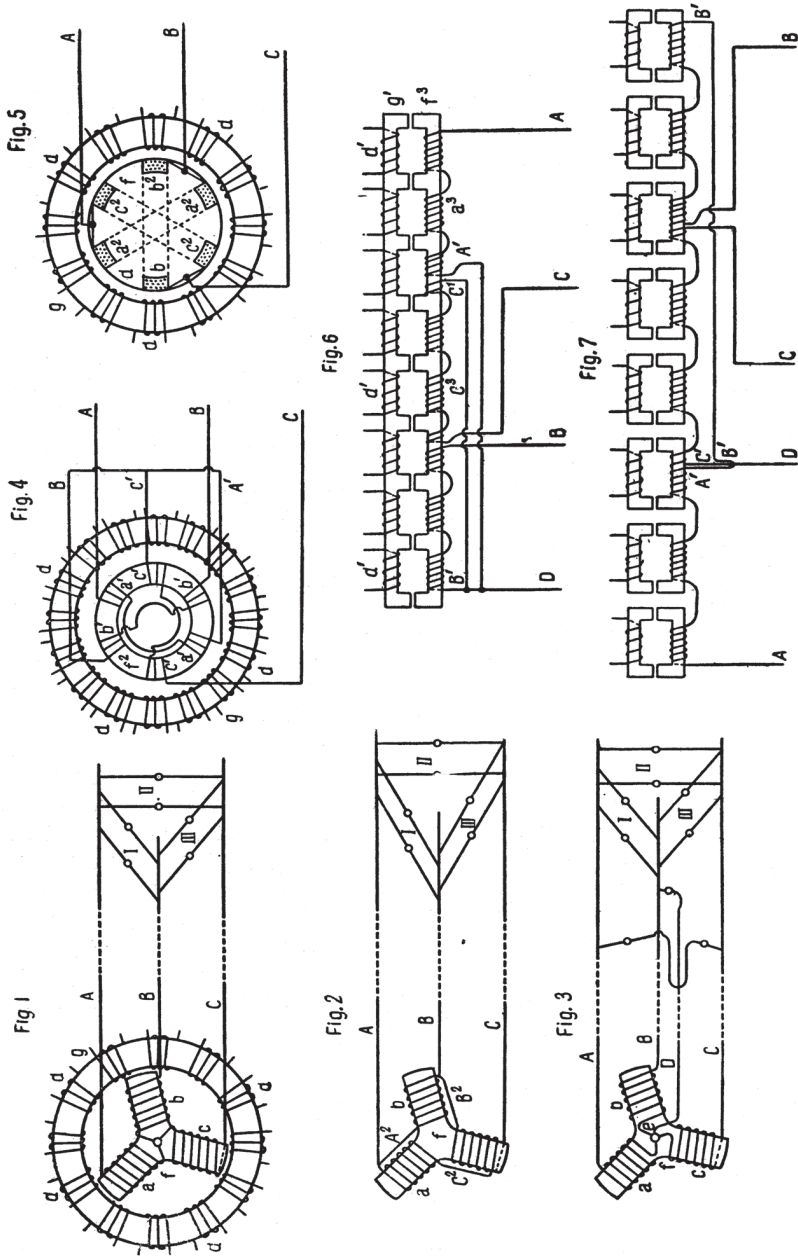


Рис. 5—21. Методы преобразования числа фаз.

проводам (А, В, С). На подстанции у потребителя трансформатор вновь может преобразовать трехфазную систему в шестифазную для питания двигателя 3. На схеме показана также возможность включения трехфазного двигателя 4 и ламп 5. В этой схеме очень ярко проявилось опасение Доливо-Добровольского в отношении возможной несимметрии нагрузки. Он предусматривает возможность регулирования тока в отдельных фазах реостатами на электростанциях. Более того, предусмотрена даже возможность повышения напряжения в отдельных фазах сверх тех пределов, которые допускает конструкция генератора 1. Для этой цели могут быть использованы однофазные вспомогательные генераторы 6 (в качестве примера показаны включенными в первую и вторую фазы).

Интересно отметить, что Доливо-Добровольский сам же впервые указал на выравнивающее действие трансформаторов и асинхронных двигателей в случае некоторой несимметрии нагрузки [Л. 7]. Поэтому подобное усложнение схемы передачи энергии может быть объяснено только тем обстоятельством, что до начала 90-х годов нагрузка электрических установок была почти исключительно осветительной, при которой возможна значительная несимметрия нагрузки отдельных фаз. С внедрением в промышленность техники трехфазного тока в сравнительно короткий срок силовая нагрузка (асинхронные двигатели) стала соизмерима по мощности с осветительной, и опасение существенной неравномерности нагрузки отдельных фаз могло быть снято.

Тем же стремлением к увеличению числа фаз объясняется еще одно изобретение М.О.Доливо-Добровольского, которое он называл «двойным сопряжением». Это изобретение относится к тому периоду, когда Доливо-Добровольский искал оптимальное решение задачи о выборе числа фаз многофазной системы. Он изучал пульсации амплитуды кривой н. с. в машине и, как помнит читатель, установил, что при трех фазах эти пульсации, хотя и не велики, но еще составляют примерно 15 %. Если число фаз удвоить, т. е. взять шестифазную машину, то пульсации уменьшатся до 4 %. Но легко понять, что увеличение числа линейных проводов до шести никак не могло быть

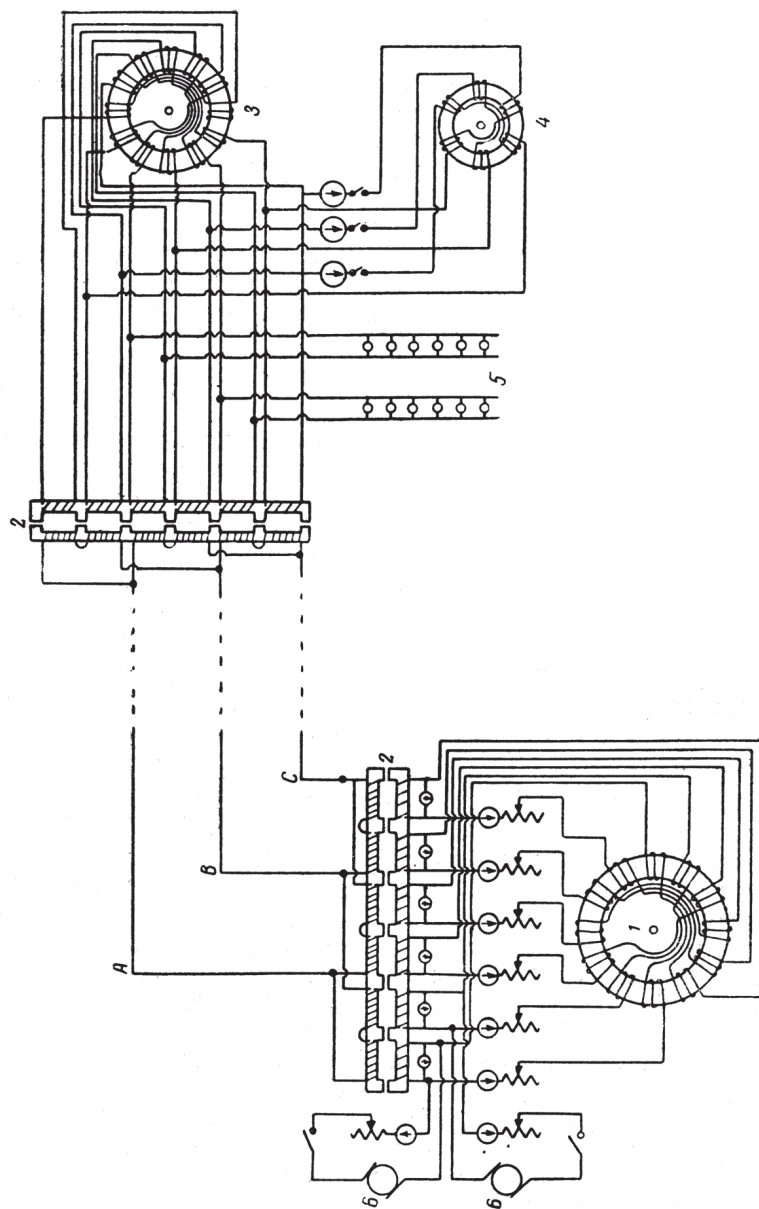


Рис. 5-22. Пример применения трансформаторов, преобразующих число фаз.
 1 — генератор; 2 — трансформатор; 3 — статор шестифазного двигателя;
 4 — статор трехфазного двигателя; 5 — лампы; 6 — вспомогательные генераторы.

компенсировано незначительным улучшением характеристик машины. Поэтому Доливо-Добровольский и остановился на трехфазной системе. Однако оказалось, что, сохранив трехпроводную сеть, можно уже в самой машине искусственно удвоить число фаз.

Это изобретение описано в английском патенте № 13503 и швейцарском патенте № 4160, заявленных в августе 1891 г.

Сущность «двойного сопряжения» состояла в следующем. Если имеется обмотка, например, изображенная на рис. 5-23,а. (соединение треугольником), то фазные токи $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$ и $I_{\phi 3}$ отличаются друг от друга по фазе на 120° . Тогда линейные токи $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$ и $I_{\lambda 3}$ по фазе сдвинуты относительно соответствующих фазных токов на 30° , а по величине

$$I_{\lambda} = 2I_{\phi} \sin \frac{\pi}{m} = 2I_{\phi} \sin \frac{\pi}{3} = \sqrt{3}I_{\phi},$$

где m — число фаз, в данном случае $m = 3$.

Провода с токами $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$ и $I_{\lambda 3}$ можно разместить в пазах той же машины таким образом, чтобы они пространственно были сдвинуты относительно проводников с фазными токами тоже на угол 30° . При этом получится обмотка, схематически изображенная на рис. 5-23,б. Для того чтобы н. с. распределялась равномерно, число витков, обтекаемых большими по величине токами $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$ и $I_{\lambda 3}$, необходимо уменьшить в $\sqrt{3}$ раз.

Экспонированный на выставке во Франкфурте асинхронный двигатель мощностью 1,5 кВт (около 2 л. с.), описанный в гл. 3, имел обмотку статора с «двойным сопряжением» и, как мы видели выше, обладал весьма хорошими характеристиками.

Следует еще раз подчеркнуть, что Доливо-Добровольский возлагал чрезмерно большие надежды на «двойное сопряжение». Больше того, когда он построил первый только что упомянутый двигатель, то он даже поспешил объявить о том, что найдена «принципиально новая система». Можно, конечно, понять это увлечение Доливо-Добровольского в тот период пионерских работ и широких научных поисков, но было явно неосторожным и поспешным опубликование

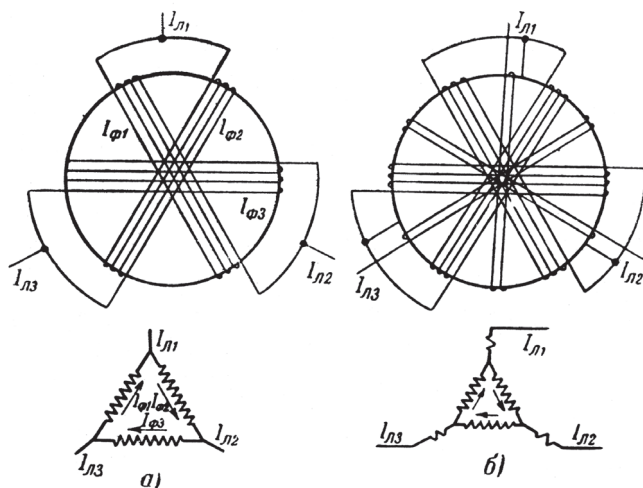


Рис. 5—23. „Двойное сопряжение“.

а — обычная трехфазная обмотка;

б — обмотка с „двойным сопряжением“.

им статьи во франкфуртском журнале «Die Elektrizität» [Л. 6]. В этой статье он называет обычный трехфазный ток «элементарным» трехфазным током и объявляет, что новая система АЭГ отличается от этого тока тем, что «в ней применяется больше, чем три фазы». В докладе на Международном конгрессе электротехников во Франкфурте (1891 г.) Доливо-Добровольский уже в более спокойных тонах описал сущность «двойного сопряжения», говоря о нем как об одном из вариантов многофазных обмоток машин [Л. 7]. Вскоре он вообще отказался от описанных способов изготовления обмотки, поскольку выяснилось, что большая часть преимуществ, получаемых в многофазных системах, достигается уже при переходе от двух фаз к трем. На этом мы можем закончить изучение работ М.О.Доливо-Добровольского, которые он выполнил в области машин переменного тока.

С 1909 г. он вступил в должность технического директора электроаппаратостроительного завода АЭГ. Правда, он оставался консультантом фирмы по электрическим машинам, но, вероятно, его консультации касались лишь наиболее общих вопросов электро-

машиностроения, так как ни о каких его конкретных изобретениях в области электрических машин больше сведений нет. Здесь можно было бы упомянуть лишь об одном, правда, более раннем патенте Доливо-Добровольского, а именно, германском патенте № 212424, от 30 июня 1908 г. Изобретение, описанное в этом патенте, касается и частного случая изготовления обмотки ротора для двигателей, в которых пространственное перемещение магнитного поля создается не трехфазным, а однофазным током, преобразованным специальным, весьма сложным электромеханическим устройством в серию последовательных импульсов. Эти импульсы по многим проводам передавались к соответствующим точкам обмотки статора двигателя и создавали бегущую и пульсирующую волну н. с. Такое устройство было предложено в 1896 г. американцами Скоттом и Дженни и запатентовано в Германии (№ 93364 от 1 июля 1896 г.). Этот преобразователь не нашел себе никакого практического применения, а вместе с ним, естественно, не нашли применения и конструкции роторной обмотки, предложенные для этого Доливо-Добровольским.

После того как мы познакомились с основными работами М.О.Доливо-Добровольского в области конструирования трансформаторов, осталось упомянуть здесь еще одну его практическую работу в той же области: изобретение схемы соединения обмоток трансформатора, согласно которой обмотка высшего напряжения соединяется в треугольник, а низшего — в звезду и имеет выведенную нулевую точку (Δ/Y_0).

Предложенная ранее М.О.Доливо-Добровольским система передачи и распределения трехфазного тока по четырехпроводной цепи позволяла допускать некоторую несимметрию нагрузки, но вместе с тем ее недостатком являлась необходимость применения на всем протяжении линии высокого напряжения четвертого нейтрального провода. Во второй половине 90-х годов Доливо-Добровольский нашел возможность сохранить указанное преимущество, свойственное четырехпроводной цепи, также в том случае, когда имеется линия с изолированной нейтралью. Это изобретение он подробно описал в внутрифирменном журнале «AEG — Zeitung» в номере от 1 ноября

1898 г. [Л. 26] и в сообщении Электротехническому обществу 26 февраля 1901 г. [Л. 30].

Доливо-Добровольский напомнил, что в трехпроводной сети однофазного тока (рис. 5-24) увеличение нагрузки в одной части сети *b* влечет за собой неизбежное падение напряжения в этой части и повышение напряжения в другой *a*. Для того чтобы исключить существенное влияние режима работы одной части сети на режим работы другой ее части, Доливо-Добровольским было предложено обе секции обмотки высшего напряжения трансформатора включать в сеть параллельно (рис. 5-25). В этом случае напряжения на обеих секциях обмотки высшего напряжения (расположенных обычно на двух стержнях) одинаковы, а следовательно, практически одинаковы магнитные потоки и вторичные напряжения. Падение напряжения в перегруженной секции трансформатора теперь мало отличается от обычного падения напряжения в трансформаторах и почти не влияет на работу второй секции.

Более поздние исследования Доливо-Добровольского показали, что такого же результата можно достичь в трехфазной цепи, если каждую фазу первичной обмотки трансформатора включить

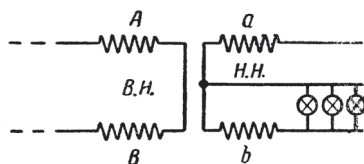


Рис. 5—24. Трехпроводная сеть однофазного тока.

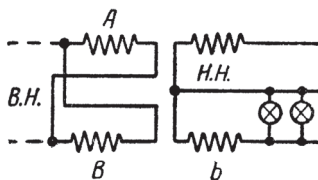


Рис. 5—25. Трехпроводная сеть однофазного тока с параллельным соединением двух секций обмотки высокого напряжения трансформатора.

на полное линейное напряжение. Последнее легко достигается при соединении обмоток в треугольник. При такой схеме соединений обмоток трансформатора Δ/Y_0 даже значительная несимметрия нагрузки (до 10–25 % по данным Доливо-Добровольского) не вызывает заметного падения напряжения в перегруженной фазе и совершенно не влияет на напряжение на зажимах других фаз (рис. 5-26, перегруженная фаза — C). Предложенное соединение обмоток Доливо-Добровольский назвал «смешанным» в отличие от ранее примерявшихся «нормальных» соединений¹. При этом он предостерегал от включения трансформаторов со «смешанным» и «нормальным» соединениями обмоток на параллельную работу. Причину недопустимости параллельной работы таких трансформаторов Доливо-Добровольский правильно объяснил тем, что фазы вторичных напряжений в этих трансформаторах не совпадают. Поэтому фирма АЭГ по рекомендации Доливо-Добровольского выпускала трансформаторы с соединением обмоток Δ/Y_0 окрашенными в особый цвет.

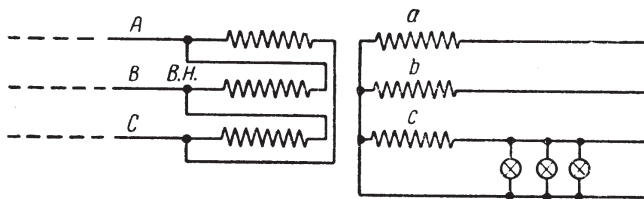


Рис. 5—26. Трансформатор с соединением обмоток Δ/Y_0 .

На такое же соединение обмоток трансформатора в Америке взял патент Ч. Штейнметц (№ 559913 от 5 февраля 1896 г.). Доливо-Добровольский и Штейнметц пришли к этому изобретению совершенно независимо друг от друга, но Доливо-Добровольский не па-

¹ Под «нормальными» Доливо-Добровольский понимал соединения обмоток трансформатора, при которых схема обмотки высшего напряжения была такой же, как и схема обмотки низшего напряжения, т. е. Y/Y или Y_0/Y_0 или Δ/Δ .

тентовал схему «смешанного» соединения обмоток трансформатора, полагая, что эта схема может рассматриваться как частный случай изобретения, описанного в его патенте на четырехпроводную систему (германский патент № 71137). Когда в журнале «ETZ» в 1901 г. был поднят вопрос о приоритете в отношении рассмотренного изобретения и указывалось при этом на работы Штейнметца и фирмы Броун-Бовери [Л. 168 и 169], Доливо-Добровольский сделал по этому поводу на страницах журнала очень тактичное замечание [Л. 30]. Он сообщил о том, что статью о схеме соединения трансформаторов Δ/Y_0 он опубликовал еще в 1898 г. в «AEG – Zeitung», напомнил о своем патенте на четырехпроводную трехфазную цепь, но вместе с тем вполне допускал, что другие ученые или инженеры могли прийти к той же идее совершенно самостоятельно.

К сказанному об изобретении схемы соединения обмоток трансформатора Δ/Y_0 остается добавить лишь то, что эта схема получила очень широкое распространение и за границей применяется до настоящего времени. В Государственный стандарт она не включена; в советском трансформаторостроении принято обратное соединение, то есть Y_0/Δ .

М. О. Доливо-Добровольский во всех своих многочисленных исследованиях старался найти теоретические обоснования тех или иных наблюдавшихся явлений и процессов. Многие вопросы теории электрических машин и трансформаторов затрагивались им в описании своих изобретений: мы это видели при изучении его работ в области многофазных систем в период до 1891 г. Некоторые вопросы теории разрабатывались другими авторами, но по непосредственным указаниям Доливо-Добровольского¹. Но некоторым вопросам теории он посвящал свои специальные исследования и публиковал их. Мы уже имели случай выше познакомиться с одной глубокой теоретической работой Доливо-Добровольского, касающейся общих вопросов теории переменного тока. Здесь мы

¹ Например, Доливо-Добровольский подсказал Рёсслеру метод исследования токораспределения и потерь в короткозамкнутом роторе [Л. 170].

кратко познакомимся с его наиболее интересными теоретическими исследованиями и выводами, относящимися к электрическим машинам и трансформаторам.

Наиболее актуальным в теории машин переменного тока в 80-х и начале 90-х годов был вопрос об определении оптимального падения напряжения в машине. Этот вопрос был тесно связан с проблемой параллельной работы синхронных генераторов и длительное время обсуждался в электротехнических кругах. Мнения были различными и часто прямо противоположными одно другому. Многие считали, что синхронные машины должны иметь большое индуктивное сопротивление. Другие вслед за Мордеем отстаивали противоположную точку зрения.

На Франкфуртском конгрессе электротехников Доливо-Добровольский указывал, что вопрос о величине падения напряжения в машине может решаться исключительно в зависимости от конкретных условий. Чаще всего генератор должен при изменениях нагрузки сохранять по возможности постоянную величину напряжения. Для этого следует позаботиться, чтобы величина магнитного потока, проходящего через якорь (статор), оставалась по возможности также постоянной. Следовательно, необходимо уменьшить в машине реакцию якоря, что достигается увеличением магнитного сопротивления (увеличением воздушного зазора) и ограничением до минимума числа витков обмотки статора.

Как можно удивляться трудностям параллельной работы машин, — спрашивал Доливо-Добровольский, если машины даже при режимах, близких к короткому замыканию, не дают нормального тока? Так велико было сопротивление машин! Чем меньше сопротивление якоря (активное и индуктивное), тем больше синхронизирующая сила — утверждал Доливо-Добровольский.

Но Доливо-Добровольский не забывал и другой стороны уменьшения сопротивления обмоток машин. Он говорил, что при малых сопротивлениях возникает серьезная опасность для машины при коротком замыкании. Однако в этом случае следует рассчитывать на действие тщательно продуманной защиты, но отнюдь не увели-

чивать внутреннее сопротивление машины. Доливо-Добровольский сочувственно цитировал следующее ироническое высказывание Мордея: «Теперь машинам задают большую самоиндукцию, чтобы защитить их от сгорания при выпадении из синхронизма, происходящем от большой самоиндукции» [Л. 37].

Таким образом, Доливо-Добровольский подчеркивал две основные задачи, которые нужно решать при рассмотрении условий параллельной работы синхронных генераторов. Во-первых, следует стремиться снизить индуктивное сопротивление машины, что вызывает увеличение синхронизирующей мощности¹. Во-вторых, следует иметь в виду, что малая величина индуктивного сопротивления увеличивает ток короткого замыкания² и необходимо позаботиться о надежной защите генераторов.

Доливо-Добровольский, как инженер-практик, требовал, чтобы теория давала свои конечные выводы такими, которые без труда могут быть использованы в практической деятельности конструктора. В одном из заседаний Электротехнического общества (30 декабря 1890 г.) он заявил: «...Я, вследствие моей работы у АЭГ, имел достаточно случаев рассчитывать и проектировать динамомашину и, таким образом, могу участвовать в разговоре как «динамостроитель»... и далее: «Только такой метод может быть использован «динамостроителем», который ему позволяет рассчитать машину на своем столе и предвидеть ее действие, прежде чем чертежи пойдут в цех» [Л. 171].

В этом же выступлении Доливо-Добровольский критиковал теоретические исследования Л. Баумгарта, который давал методы расчета электрических машин, нереальные в практических условиях

¹ Вспомним, что в упрощенном виде (для ненасыщенной неявнополюсной машины) синхронизирующая мощность $P_c = mU \frac{E_0}{X_c} \cos \theta$, где X_c – синхронное сопротивление, E_0 – наведенная э. д. с.

² $I_k = \frac{E_0}{X_c}$.

(например, исходя из заданного веса меди якоря). Доливо-Добровольский говорил, что едва ли можно дать конструктору математические строгие формулы или точные графики для выбора размеров машины. Здесь же он вставал на защиту метода расчета магнитной цепи машины, предложенного Гопкинсонами и Каппом.

В 1890–1891 гг. появились первые сведения о работах известного английского ученого Суинбёрна, который для компенсации большого реактивного тока, потребляемого его трансформаторами с разомкнутой магнитной цепью, предложил применять конденсаторы или перевозбужденные синхронные двигатели. Доливо-Добровольский сейчас же подхватил и развил идеи Суинбёрна об условиях работы синхронной машины и о влиянии характера нагрузки на реакцию якоря. Более того, он нашел и обосновал важное практическое применение для перевозбужденных синхронных машин. Когда в 1892 г. была построена трехфазная линия передачи Бюлах — Эрликон (Швейцария), то оказалось, что двигатели в Эрликоне потребляют очень большой реактивный ток, который перегружал линию передачи. Для того чтобы разгрузить линию и генераторы на электростанции Доливо-Добровольский предложил на понизительной подстанции установить перевозбужденную синхронную машину, или как он называл ее, «безваттный генератор». Это было первое практическое применение в электрической сети синхронного компенсатора¹. С этого момента синхронные компенсаторы начали находить все более и более широкое применение в электрических системах.

Некоторых вопросов теории электрических машин Доливо-Добровольский коснулся также в своем выступлении на заседании Электротехнического общества 26 января 1897 г. [Л. 173]. Здесь он вновь обращается к вопросу о реакции якоря в машинах переменного тока и, в частности, в индукторных генераторах. Он высказал

¹ Доливо-Добровольский сообщил об использовании им перевозбужденных синхронных машин для улучшения $\cos \varphi$ Второму годовому собранию Союза германских электротехников 8 июня 1894 г. [Л. 172], а также кратко в статье «Из истории трехфазного тока» [Л. 37] и в письме в редакцию «ETZ» от 23 сентября 1894 г. [Л. 19].

некоторые соображения о процессе наведения э. д. с. в индукторных генераторах, о выборе ширины зубцов индуктора. Далее он указал на ступенчатое распределение н. с. статора в синхронном генераторе и неравномерность искажения магнитного поля возбуждения вследствие реакции якоря. Он отметил, что эти искажения существенно зависят от коэффициента мощности нагрузки и от формы полюсных башмаков (в явнополюсной машине). В отношении предварительного расчета падения напряжения в машине Доливо-Добровольский указал, что для этого нет необходимости выводить сложные и точные формулы («Машины строятся не для подтверждения теорий, а для их практического использования в установках» — говорил он). Если спроектировать машину по точным формулам («в обрез»), то малейшее изменение режима против проектного (например, некоторое изменение коэффициента мощности или нагрев обмотки возбуждения от постороннего источника тепла и т. д.) существенно изменяют характеристики машины.

Одной из крупных теоретических работ М.О.Доливо-Добровольского является исследование зубчатых якорей электрических машин. Быстрое развитие электромашиностроения во многих вопросах обогнало теоретические исследования. Так случилось в отношении обнаруженного С. Томпсоном и Суинбёрном факта механической разгрузки проводников в пазах машины. Тесно к этому вопросу примыкало также и исследование обнаруженного на практике значительного снижения потерь на вихревые токи в проводниках, уложенных в пазы.

В 1897 г. Мордей осуществил тщательно организованный эксперимент, который подтвердил, что основное тяговое усилие приложено к зубцам якоря, а не к проводникам, как это имеет место у «гладкого» якоря. Это утверждение Мордея многих озадачило. Казалось, что рушатся привычные представления об электромагнитной индукции. Привлекались на помощь классические выводы и формулы Фарадея и Максвелла, многолетний опыт исследований, наконец, «здравый смысл», и все говорило о том, что усилие должно быть приложено к проводнику, находящемуся в магнитном поле. Пытались найти ошибку в постановке самого опыта Мордея.

В обстановке исканий, сомнений и споров выступил с изложением своих взглядов на этот вопрос М.О.Доливо-Добровольский. Он сделал доклад на Пятом годовом собрании Союза германских электротехников в июне 1897 г. на тему: «Соображения о якорях с закрытыми и открытыми пазами». Доклад этот был полностью опубликован в «ETZ», «The Electrician», «Electrical Engineer» [Л. 25], а дискуссия, вызванная докладом, и отклики на доклад появились почти во всех электротехнических журналах мира. В России по этому вопросу выступил тогда еще молодой ученый, а впоследствии академик В.Ф.Миткевич [Л. 174].

Доливо-Добровольский начал свой доклад с утверждения о том, что Мордей прав, что никакой ошибки в опыте он не сделал, а только не сумел теоретически обосновать обнаруженные им явления. И далее Доливо-Добровольский при помощи схематических чертежей и несложных рассуждений показал, что при наличии зубцов механическое усилие действительно как бы переносится с проводников на зубцы. Правда, его доказательство еще отличалось от современных представлений о дополнительной деформации магнитных линий, которая возникает при наличии зубцов.

Объяснение Доливо-Добровольского впоследствии получило широкое признание. Позднее доктор Флейшманн осуществил в АЭГ наглядный опыт, по идее совпадающий с рассуждениями Доливо-Добровольского и демонстрирующий правильность его выводов. Этот опыт был поставлен в 1925 г. и описан в советской литературе К.И.ШЕНФЕРОМ [Л. 175].

Причина возникновения вихревых токов в проводниках обмотки «гладкого» якоря была уже известна, и Доливо-Добровольский кратко напомнил ее. Если нарисовать картину магнитного поля между полюсом и якорем, то легко заметить, что при приближении к полюсу различные части проводников будут находиться в неравномерном поле. Одна сторона проводников находится в более сильном поле, другая — в более слабом. Следствием этого являются неравномерность наведения э. д. с. в волокнах проводника по его сечению и возникновение вихревых токов.

Но как обстоит дело в случае зубчатого якоря? Доливо-Добровольский показал, что можно изобразить любое положение ротора и, построив картину поля, убедиться, что в случае ненасыщенных зубцов практически все магнитные линии проходят только через зубцы. Но если в пазу, по существу, нет магнитного поля, то не будет и вихревых токов в проводниках.

Это объяснение Доливо-Добровольского было также признано правильным. Для наиболее эффективного уменьшения величины потерь на вихревые токи в меди якоря стали конструировать зубчатые якоря с полузакрытым или полуоткрытым (для возможности применения шаблонной обмотки) пазом. Такие формы паза обеспечивают лучшие условия для уменьшения величины магнитной индукции в пазу.

В конце доклада Доливо-Добровольский поставил вопрос, который оказался наиболее сложным и решить который ему не удалось. Вопрос заключался в том, чтобы объяснить, каким образом силовые линии при вращении зубчатого якоря переходят из одного зубца в другой. Действительно, если доказано, что в пазу в состоянии покоя почти нет магнитного поля и при любом сколь угодно малом перемещении якоря его также почти не удастся обнаружить, то как же при условиях непрерывности магнитного потока силовые линии переходят через паз при вращении якоря?

Некоторые электрики полагали, что силовые линии каким-то образом «обходят» пазы. Но это противоречило утвердившимся представлениям о непрерывности магнитного потока и об общей картине магнитного поля.

Доливо-Добровольский говорил, что, если под силовыми линиями понимать «только направление и количественное состояние магнитного поля», то при вращении зубчатого якоря происходит постоянное количественное изменение магнитного потока в зубцах впереди рассматриваемого паза и позади него. Эти количественные изменения потока и вызывают наведение соответствующей э. д. с.

Но здесь Доливо-Добровольский ответил лишь на вопрос: что происходит, но не ответил на вопрос: *как* происходит. Однако упрек-

нуть его в том, что ему не удалось дать четкого ответа на поставленный вопрос, мы не можем. Этот вопрос требовал специальных глубоких исследований, выходящих, пожалуй, за рамки электротехники в область физики.

После доклада Доливо-Добровольского на страницах многих электротехнических журналов развернулась широкая дискуссия. Одним из первых попытался дать полный ответ на поставленный вопрос В.Ф.Миткевич. В своей ранней работе [Л. 174] он показал, что силовые линии при вращении якоря проходят через паз с очень большой скоростью. Тогда в формуле, по которой обычно вычисляют э. д. с. в витке $e = Blv$, следует подставлять скорость витка не по отношению к неподвижным частям машины, а по отношению к проходящим через паз силовым линиям. Увеличение скорости в точности компенсирует снижение магнитной индукции в пазу, и поэтому получают величину э. д. с. в проводнике, уложенном в паз, точно такой же, как и величина э. д. с. в проводнике гладкого якоря, если в последнем случае скорость проводника берется по отношению к неподвижным частям машины. Практически, чтобы не вычислять скорости движения силовых линий через паз, в указанную формулу подставляется скорость проводника относительно неподвижных частей машины, но для зубчатого якоря вместо действительного значения индукции в пазу подставляют в формулу среднее значение индукции в воздушном якоре, т. е. такое, какое имело бы место в случае гладкого якоря.

Заслугой Доливо-Добровольского можно считать не только объяснение тех явлений, о которых речь шла выше, но и сам факт острой постановки вопроса, вызвавшего широкую дискуссию. Обсуждение физических процессов, происходящих в проводниках зубчатых якорей, помогло составить более полное представление о работе электрической машины.

Очень широкую известность получило выполненное М.О.Доливо-Добровольским глубокое исследование физических процессов в транс-

форматорах. Этот труд, явившийся конкретным ответом на требования теории и практики трансформаторостроения, не потерял своего практического значения до наших дней.

Появление этой работы Доливо-Добровольского будет более понятным, если принять во внимание, что в конце 80-х и начале 90-х годов было широко распространено мнение о принципиальной неэкономичности трансформаторов, устанавливаемых в городских электрических сетях. Такое мнение обосновывалось тем, что большую часть времени трансформаторы должны работать при очень малых нагрузках, значительно меньших номинальной. Преобладающая световая нагрузка давала резко неравномерные суточный и годовой графики потребления энергии с резкими пиками в утренние и вечерние часы, особенно в зимнее время. Если трансформатор рассчитывался на максимальную нагрузку, то в дневные и поздние ночные часы он работал с низким к. п. д. Это обстоятельство служило одним из серьезнейших доводов против внедрения трехфазного тока.

Доливо-Добровольский оценивал создавшееся положение следующим образом: «... в литературе имеется очень мало о том, как нужно конструировать аппараты, чтобы они были экономичны, каких точек зрения должен придерживаться заводской электротехник, если он хочет создать действительно практические и жизнеспособные формы трансформаторов, и об этом следует пожалеть. Этим объясняются многие совершенно ошибочные положения, идеи и суждения, которые возникли в давнее время и с трудом поддаются искоренению» [Л. 13].

Свою работу «О коэффициенте полезного действия трансформатора» Доливо-Добровольский представил в виде доклада Берлинскому электротехническому обществу, состоявшемуся 22 марта 1892 г. Этот доклад, значение которого было сразу же по достоинству оценено, был полностью напечатан в «ETZ» [Л. 13] и перепечатан многими крупными электротехническими журналами. Полный текст доклада включен в сборник избранных трудов М.О.Доливо-Добровольского, выпущенный в свет Госэнергоиздатом в 1948 г.,

и хорошо известен советскому читателю. Это обстоятельство освобождает нас от необходимости подробно разбирать замечательный труд Доливо-Добровольского и позволяет лишь напомнить его основные идеи и выводы.

В начале работы кратко формулируются важнейшие теоретические положения, развитые Доливо-Добровольским на Франкфуртском конгрессе электротехников. Затем на этой основе делаются выводы применительно к трансформаторам. В кратком изложении эти выводы, которые, как легко видеть, легли в основу всех дальнейших исследований о трансформаторах, состояли в следующем:

1. Магнитный поток трансформатора независимо от нагрузки всегда имеет примерно постоянную величину, следовательно, и потери на гистерезис остаются примерно постоянными.
2. При холостом ходе трансформатора ваттный (активный) ток весьма мал.
3. Ток холостого хода трансформатора состоит главным образом из безваттного (реактивного) тока возбуждения и поэтому зависит от магнитного сопротивления.
4. Вследствие малой величины ваттного (активного) тока при холостом ходе ток возбуждения (намагничивающий ток) обусловливает значительное отставание результирующего тока по фазе.
5. При чисто активной нагрузке трансформатора возрастает только ваттная (активная) составляющая тока и тем самым уменьшается сдвиг фаз. Часто этот сдвиг фаз столь ничтожен, что его не следует принимать во внимание: так, уже в случае, если реактивный ток составляет даже 10 % от активного, $\cos \phi = 0,985$.
6. Если намагничивающий ток велик (как у трансформаторов с разомкнутой магнитной цепью), то не следует пренебрегать тепловыми потерями в меди и при холостом ходе.
7. Если трансформатор работает на индуктивную нагрузку, то он потребляет из сети также в основном реактивный ток, и уменьшение сдвига фаз не имеет места. Трансформатор

входит в систему как добавочный элемент со своими собственными реактивным током и активным током, обусловленным потерями.

8. Можно увеличить намагничивающий ток, например, путем прокладки бумаги на стыках сердечников, т. е. путем увеличения магнитного сопротивления трансформатора. Это ведет к компенсации обратного сдвига фаз при емкостной нагрузке (например, длинная линия) и дает, таким образом, возможность снизить до определенного минимума ток, вырабатываемый генератором.

После этого Доливо-Добровольский переходит к исследованию вопроса о выборе размеров трансформатора.

«Достигнуть малых потерь энергии в железе, — говорит Доливо-Добровольский, — и обеспечить достаточное место для обмотки — одна из сложнейших задач при построении трансформаторов». Потери на гистерезис при данном значении индукции пропорциональны количеству стали. Двухлетние исследования проб стали позволили Доливо-Добровольскому ввести существенные поправки в кривые удельных потерь в железе, полученные Юингом, и дать собственные, более точные кривые.

Экономичным трансформатор следует считать только тогда, когда он обладает достаточно высоким «средним» к. п. д., под которым Доливо-Добровольский понимал отношение энергии, отданной трансформатором потребителю в течение суток, к энергии, полученной трансформатором за то же время из первичной сети.

Потери в трансформаторе Доливо-Добровольский делит на две части, которые он называет: «потери в меди» и «потери в железе». Потери в меди изменяются пропорционально квадрату нагрузки и поэтому оказывают малое влияние на «средний» к. п. д., так как трансформатор большую часть времени работает при малых нагрузках. Потери в железе практически постоянны ввиду постоянства магнитного потока, и они играют тем большую роль, чем меньше нагрузка. Следовательно, если хотят иметь высокий среднесуточный к. п. д., то нужно стремиться к снижению потерь в железе.

В трансформаторе нельзя увеличить сечение меди (для уменьшения потерь в ней) без того, чтобы одновременно не увеличить количества стали. Условно трансформатор можно представить себе в виде туго входящих друг в друга звеньев цепи, одно из которых медное, а другое — стальное (рис. 5-27). Лишь только изменятся размеры одного звена, как тут же необходимо соответственно изменить размеры другого. Следовательно, помня, что меньшую роль при малых нагрузках играют потери в меди, следует для достижения высокого среднесуточного к. п. д. допускать сравнительно большие потери в меди и за счет этого уменьшать количество стали¹. Это было новое слово в практике конструирования трансформаторов, опрокидывавшее установившиеся представления о том, что медные провода следует максимально окружать сталью, чтобы экономить на меди.

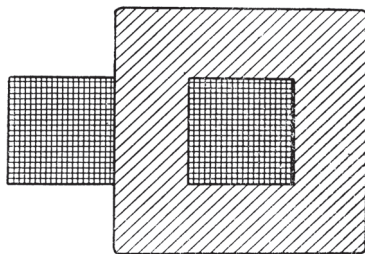


Рис. 5—27. К иллюстрации взаимосвязи количеств меди и стали в трансформаторе.

Некоторое падение напряжения, которое неизбежно имеется во всех трансформаторах, Доливо-Добровольский предлагал компенсировать соответствующим повышением напряжения на электростанции примерно на 2 % или несколько больше. В результате, учитывая падение напряжения в линии (2–3 %), генераторное напряжение

¹ Как известно, максимальный к. п. д. трансформатора имеет место при равенстве потерь в меди и потерь в стали. По-видимому, именно к этому равенству переменных и постоянных потерь при среднесуточной нагрузке и стремился Доливо-Добровольский.

следует повышать на 5–7 % и в самом крайнем случае даже на 10 %. В результате общий экономический эффект будет более значительным, чем в том случае, когда трансформатор спроектирован на максимальный к. п. д. при максимальной нагрузке.

После того как определено необходимое количество стали, можно обсудить вопрос о форме магнитопровода. Эта форма в любом случае должна быть такой, утверждает Доливо-Добровольский, чтобы было больше места для обмотки. Следовательно, стержни должны быть, по возможности, высокими и иметь сравнительно небольшое поперечное сечение. Далее Доливо-Добровольский делает важное замечание: «Так как при увеличении поперечного сечения длина витка растет медленнее, то большие трансформаторы могут быть построены значительно лучшими, чем малые. Поэтому нельзя не предостеречь настоятельно от американской точки зрения: в каждом самом малом доме устанавливать свой трансформатор».

Таким образом, Доливо-Добровольский наметил правильную тенденцию к увеличению единичной мощности трансформаторов.

В заключение доклада Доливо-Добровольский привел цифровые данные и характеристики трансформаторов своей конструкции и сравнил их с характеристиками трансформаторов старых конструкций. Так, однофазный трансформатор, 20 *кВа*, 5 000/100 *в*, 40 *Гц* имел более благоприятную зависимость к. п. д. от нагрузки, чем трансформатор старой конструкции. Кривые для нового (сплошная линия) и старого (прерывистая) трансформаторов приведены на рис. 5-28.

Свой доклад Доливо-Добровольский заключает следующими словами: «Я надеюсь, что сумел доказать неосновательность столь широко распространенного мнения, будто трансформаторные установки не могут окупаться именно вследствие чрезмерных суточных потерь. В соответствии с этим исчезают последние доводы против внедрения трехфазного тока для передач на большие расстояния и распределения электроэнергии».

Нет необходимости подбирать выражения для того, чтобы дать высокую оценку рассмотренной работе Доливо-Добровольского. Эта его работа говорит сама за себя: все идеи и положения ее мож-

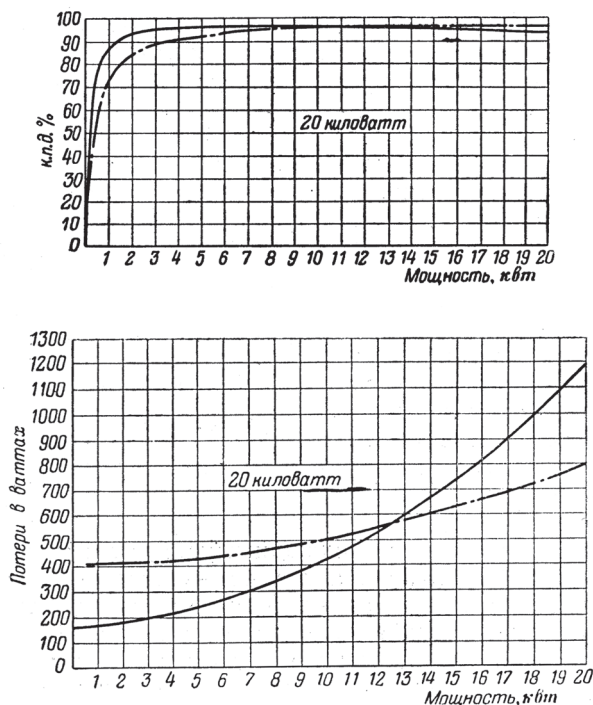


Рис. 5—28. Потери и к. п. д. в трансформаторах мощностью примерно 20 квт. Сплошная линия — трансформаторы М.О.Доливо-Добровольского; прерывистая линия — старые трансформаторы.

но найти в современных учебниках и пособиях по трансформаторам. Этой работой вместе с известными исследованиями Каппа и Штейнметца были заложены основы теории и проектирования трансформаторов. И прав был ее автор, который считал, что ему удалось устранить последние доводы против внедрения трехфазного тока. Действительно, один из наиболее активных творцов техники трехфазного тока снимал одну за другой все преграды, возникавшие на пути нового, развивавшегося дела, рост которого можно было притормозить, но остановить было уже невозможно.

«СЛЕДОВАТЬ ЗА МЫСЛЯМИ ВЕЛИКОГО ЧЕЛОВЕКА
ЕСТЬ НАУКА САМАЯ ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ».

А.С.Пушкин

ГЛАВА VI

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ

ПРИБОРЫ

*Автоматический выключатель с пружинящими пластинчатыми контактами.
Дугогасительные устройства. Электромагнитные измерительные приборы.
Ваттметровый метод измерения потерь в стали. Индукционные приборы.
Ферродинамические приборы. Метрологические работы.*

Деятельность М.О.Доливо-Добровольского была весьма многосторонней. Посеянные им во многих областях электротехники зерна дали быстрые всходы и обильный урожай. Плодами его трудов человечество пользуется и по сей день.

Мы могли уже ранее заметить, что Доливо-Добровольский сосредоточивал максимум своего внимания на тех участках прогресса электротехники, на которых в данный момент встречалось более всего трудностей. А, пожалуй, наибольшие трудности в развитии электротехники в последние годы прошлого столетия и с первых лет текущего столетия представляли собой выключатели высокого напряжения.

Простейшая коммутационная аппаратура в виде различных переключателей появилась примерно в 20-х годах прошлого века, в период интенсивного изучения действий электрического тока. Обычным типом контактных элементов в этих переключателях являлись металлические стержни, опускавшиеся в сосуды с ртутью. С возникновением энергетических применений электричества начинают создаваться различные конструкции выключателей. Но ртутные контакты остаются и широко применяются в выключателях, устанавливаемых на центральных станциях [Л. 176]. Так, в 1887 г., например, такие выключатели были установлены на электростанции в Риме, которая работала на линию передачи с напряжением 2 000 в и током 200 а.

Легко понять, что такие выключатели не могли длительное время удовлетворять потребностям развивавшейся электроэнергетики. Применение ртути делало их дорогими, нетранспортабельными, тяжелыми; отключение было более или менее надежным только при многократном разрыве цепи тока. Все это заставляло искать более совершенную конструкцию контактных элементов. И такая конструкция была найдена.

В 1893 г. на Чикагской всемирной выставке среди многочисленных экспонатов АЭГ демонстрировался максимальный автоматический выключатель, в котором впервые были применены пластинчатые пружинящие контакты, замыкаемые массивным ножом [Л. 177]. Этот выключатель (рис. 6-1) привлек всеобщее внимание. Автором изобретения был М.О.Доливо-Добровольский.

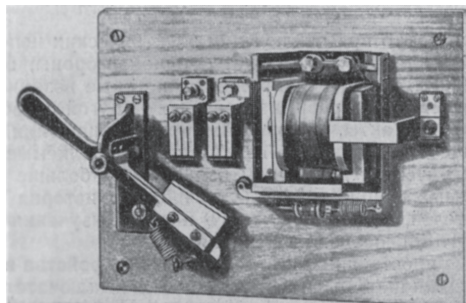


Рис. 6—1. Выключатель М.О.Доливо-Добровольского (1893 г.).

Принцип работы выключателя достаточно прост. Массивный медный нож замыкал пластинчатые пружинящие контакты, замыкая тем самым цепь тока. Нож под действием пружины стремился выйти из контактов и удерживался во включенном состоянии защелкой, механически связанной с якорем электромагнита. Обмотка последнего была включена последовательно в цепь тока. Когда ток достигал установленной величины, якорь притягивался, и защелка освобождала нож. Настройка аппарата производилась винтом, который регулировал натяжение пружины (расположена под электромагнитом), удерживающей защелку с якорем.

В то же время пружинящие контакты стали применяться в выключателях других электротехнических фирм и впоследствии стали основным типом контактных элементов. Но, как это обычно бывает, вслед за решением одной проблемы возникают проблемы новые и еще более сложные. Действительно, посмотрим, что происходило в интересующей нас области. Общей тенденцией в развитии электроэнергетики всегда являлось увеличение мощностей и напряжений в линиях электропередачи. Следовательно, за ростом этих параметров должны были успевать — именно успевать — конструкции выключателей высокого напряжения. К сожалению, они далеко не всегда оказывались на уровне предъявлявшихся требований и обычно получалось так, что электроаппаратостроение сдерживало развитие техники производства и передачи электроэнергии. Но зато конструкторы и изготовители выключателей всегда имели мощный стимул для работы, всегда видели перед собой ясную цель.

Известно, что при отключении электрических цепей возникает электрическая дуга. Она, с одной стороны, защищает сеть от громадных перенапряжений, которые возникали бы в случае мгновенного разрыва цепи, но с другой стороны, дуга разрушает контакты, опасна в пожарном отношении и усложняет процесс отключения. Трудности, доставляемые инженерам электрической дугой, тем больше, чем больше величина отключаемых мощностей. Собственно, вся история развития выключателей есть прежде всего история изучения электрической дуги и способов ее гашения.

Первые простейшие дугогасительные устройства в виде роговых разрядников были использованы в выключателях в конце 90-х годов. Для ускорения перемещения дуги между рогами стали применять магнитное дутье, т. е. были разработаны конструкции камер выключателей, в которых при помощи специальных катушек создавалось магнитное поле; дуга под действием электродинамических сил очень быстро перемещалась в этом магнитном поле.

Несколько конструкций дугогасительных устройств было создано М.О.Доливо-Добровольским. Патенты на эти устройства были получены на имя фирмы АЭГ, и автор их долгое время не был известен. Лишь после того, как в 1928 г. известный американский электрик Слепьян построил в лаборатории фирмы Вестингауз выключатель с деионной решеткой, повторявшей в принципе изобретения Доливо-Добровольского, а в 1929 г. появились сведения о применении деионной решетки в контакторах [Л. 178], фирма АЭГ выступила в защиту своих интересов. Сотрудник фирмы доктор Альфред Кон опубликовал в журнале «ETZ» краткое сообщение о германском патенте № 266745 и указал, что автором описанного в нем изобретения является М.О.Доливо-Добровольский [Л. 179]. В вышедшем в 1930 г. Петерсеновском сборнике трудов АЭГ [Л. 66] Кон совместно с Ульбрихом опубликовал большую статью, посвященную работам Доливо-Добровольского в области выключателей высокого напряжения¹. Так, борьба за интересы фирмы помогла выяснить историю нескольких важных изобретений.

Если во Всесоюзной патентной библиотеке взять германские патенты, относящиеся к группе «Выключатели с разъединением контактов и тушением дуги в газе» (класс 21, подкласс С, группа 35), то легко заметить, что все патенты, принадлежащие фирме АЭГ, заявлены в период с сентября 1910 г. по 23 июля 1914 г. Именно в этот период (с 1909 по август 1914 г.) Доливо-Добровольский яв-

¹ Материалы этой статьи были использованы проф. О.Б.Броном, впервые сообщившим на страницах отечественной печати о части рассматриваемых здесь изобретений М.О.Доливо-Добровольского [Л. 43].

лялся техническим директором аппаратостроительного завода АЭГ. (Любопытно, что следующий патент АЭГ по этой же группе был заявлен только в июле 1920 г.). В связи с этим едва ли можно сомневаться в том, что все эти патенты АЭГ за указанный выше период фактически принадлежали Доливо-Добровольскому или, в крайнем случае, явились результатом работ, проведенных при его участии и под его руководством. В настоящее время удалось установить авторство Доливо-Добровольского в отношении следующих патентов: № 266745, № 272742 и № 293332. На эти патенты сделано прямое указание в статьях Кона и Ульбриха. Нет сомнений, что патент № 256517 принадлежит также Доливо-Добровольскому, поскольку на него имеются ссылки в текстах перечисленных выше патентов, а часть его текста почти дословно совпадает с частью текста тех же патентов. В отношении двух прочих патентов АЭГ, заявленных до 1914 г. (№ 285774 и № 286609), авторства доказательно установить не удалось и рассматривать их в связи с работами Доливо-Добровольского было бы преждевременным.

Рассмотрим содержание патентов М.О.Доливо-Добровольского на конструкции дугогасительных устройств.

Первый из них (№ 256517) был заявлен 16 сентября 1910 г. на «устройство для ограничения пространственного распространения электрической дуги в высоковольтных электрических аппаратах». Текст патентного описания начинается следующими словами: «Если в электрических аппаратах, как-то: выключателях, предохранителях и т. п., позволить электрической дуге, возникающей при разрыве тока, свободно подниматься между рогообразными электродами, то она достигнет при высоких напряжениях чрезвычайно большого распространения».

Для предотвращения выбрасывания дуги из аппарата предлагается расположить между рогами поперечные перегородки из изоляционного материала. На рис. 6-2 представлены чертежи из указанного патента. Здесь изображен выключатель с дугогасительным устройством. Между рогообразными элементами 1 и 2 расположены поперечные перегородки 4. Для интенсификации процесса гашения

дуги применено магнитное дутье, причем на первом чертеже отчетливо видна цепь тока дуги, проходящего через катушки, создающие магнитное поле. При отключении сначала разрываются рабочие контакты, а затем верхний дугогасительный контакт. Дуга, возникающая при разрыве дугогасительных контактов, поднимается по роогообразным элементам и волнообразно изгибается вокруг нижних кромок пластин. При этом длина дуги увеличивается и возрастает сопротивление дугового промежутка; кроме того, дуга охлаждается, прижимаясь к пластинам, обладающим большой теплоемкостью. Создаются необходимые условия для гашения дуги.

На втором чертеже представлено аналогичное дугогасительное устройство, примененное для молниеотвода. Для того чтобы дуга не разрушала стенок камеры и удерживалась, по возможности, в среднем положении относительно этих стенок, рекомендуется в поперечных перегородках делать вырез, как это показано на третьем чертеже рис. 6-2. Кромку этого выреза следует армировать особо огнеупорным материалом.

Таково краткое содержание патента на дугогасительную решетку с поперечными пластинами из изоляционного материала. Это изобретение впоследствии применялось в различных конструкциях выключателей и контакторов.

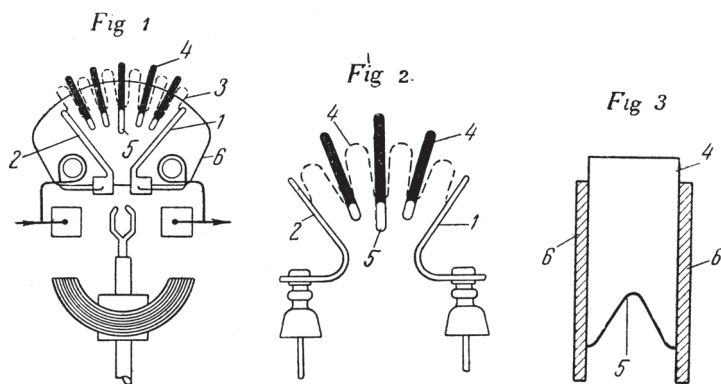


Рис. 6—2. Дугогасительное устройство с пластинами из изоляционного материала.

Второй патент (№ 266745) был заявлен 4 мая 1912 г. Текст этого патента в начале почти совпадает с текстом предыдущего патента. Так, в патентном описании читаем: «Электрическая дуга, особенно в цепях постоянного тока, для того чтобы оборваться, должна достичь определенной длины, которая зависит от величины электродвижущей силы цепи и ее сопротивления.

Электрические аппараты, как-то: выключатели, предохранители и т. п., конструируются теперь таким образом, что они надежно разрывают дуги очень большой длины, возникающие при коротких замыканиях. Если электрической дуге позволить свободно подниматься в рогообразных электродах, то она при высоких напряжениях достигает чрезвычайно большого распространения...

Теперь уже пространственное распространение электрической дуги ограничивают таким образом, что, например, привлекают к разрыву дуги действие магнитного поля; кроме того, чтобы предотвратить выбрасывание дуги из аппарата, располагают на ее пути отдельные перегородки, вокруг ребер которых дуга волнообразно изгибается».

Теперь М.О.Доливо-Добровольский предлагает устанавливать на пути дуги поперечные перегородки, но не из изоляционного материала, а из металла, обладающего большой теплоемкостью, или из другого материала с металлическим покрытием. Принцип гашения дуги в этом случае уже иной. Дуга здесь разбивается пластинами на ряд коротких дуг. Общее напряжение при этом оказывается приложенным к нескольким промежуткам, и если число промежутков выбрано правильно, напряжение на каждом из них оказывается недостаточным, чтобы поддерживать дугу. Кроме того, происходит интенсивный отвод тепла дуги через металлические пластины.

Число пластин согласно указаниям Доливо-Добровольского выбирается в зависимости от напряжения и рода тока. При переменном токе дуга не может поддерживаться при напряжении ниже 300 в¹.

¹ Слепая установил, что немедленно после прохождения тока через нуль электрическая прочность промежутка достигает 178 в эффективного значения или 250 в максимального значения. Таким образом, цифры Слепая близки к тем, которые ориентировочно указал еще в 1912 г. Доливо-Добровольский.

Так, при отключении тока напряжением 6 000 в следует число пластин выбирать равным примерно $\frac{6000}{300} = 20$. Особое внимание Доливо-Добровольский уделял хорошей теплопроводности пластин и подчеркивал важность применения воздушного или магнитного дутья.

На рис. 6-3 приведены чертежи из рассматриваемого патента. Схема (но не принцип!) действия выключателя, показанного на первом чертеже, аналогична действию выключателя, описанного в предыдущем патенте. Внешнее отличие состоит лишь в том, что на пути дуги расположены металлические пластины. На соседнем чертеже показано другое исполнение выключателя. Здесь контакт 4 оттягивается в сторону по стрелке; дуга при помощи воздушного или магнитного дутья поднимается к пластинам 5 и разбивается на несколько

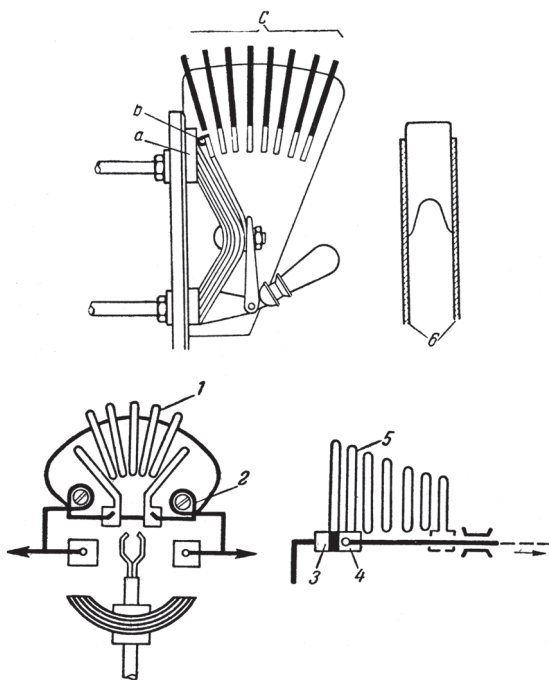


Рис. 6—3. Дугогасительное устройство, действующее на принципе гашения коротких дуг.

коротких дуг. Поскольку в первый момент наибольшие напряжения падают на промежутки между первыми пластинами, то их рекомендуется изготавливать несколько большего размера и из материала с лучшей теплопроводностью. Еще один из возможных вариантов исполнения выключателя очевиден из третьего чертежа.

Для того чтобы, по возможности, фиксировать пространственное положение дуги, здесь так же, как и в предыдущем случае, рекомендуется в нижней части пластин делать вырез. Гашению дуги способствует также веерообразное расположение пластин: дуги, горящие в каждом промежутке, поднимаясь вверх, удлиняются.

Основная цель изобретений Доливо-Добровольского состояла в том, чтобы обеспечить надежное гашение дуги, не допустить ее выбрасывания из аппарата, предотвратить возможные замыкания дуги на заземленные части аппарата, а также избежать, по возможности, выжигания стенок камеры. Вырезы в нижних кромках пластин, фиксируя положение дуги, обеспечивали достижение последней цели, но лишь при сравнительно невысоких напряжениях. Для того, чтобы повысить предел допустимых напряжений, Доливо-Добровольский разработал новую конструкцию искрогасительной решетки. Эту конструкцию он запатентовал в дополнение к предыдущему патенту. Дополнение было заявлено 24 июля 1912 г. и оформлено в виде патента № 272742.

Сохраняя принципы предыдущего изобретения, Доливо-Добровольский заменил применявшиеся там пластины дисками (рис. 6-4). При отключении контакт 4 двигался в направлении стрелки *l*. Дуга

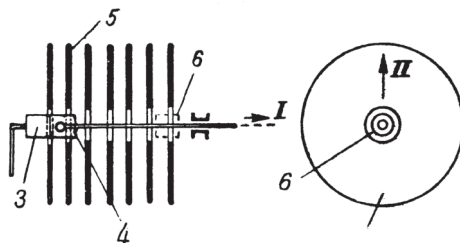


Рис. 6—4. Дугогасительное устройство с фиксированным положением дуги.

под действием воздушного или магнитного дутья дробилась и поднималась между дисками по стрелке II. Любые отклонения дуги здесь не были опасны для аппарата.

Кон и Ульбрих отыскиали на складах АЭГ модели выключателей Доливо-Добровольского и испытали их, спустя полтора десятилетия с момента их изготовления. Одна из испытывавшихся моделей, изготовленная в 1914 г., показана на рис. 6-5.

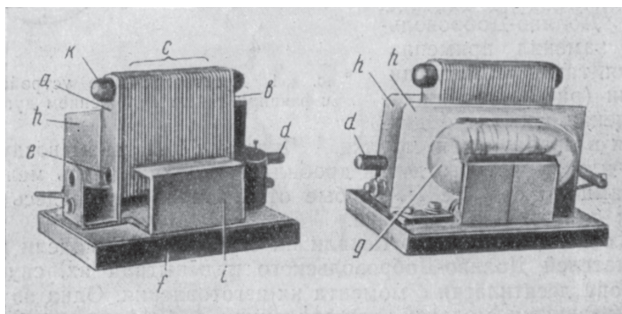


Рис. 6—5. Модель выключателя М.О.Доливо-Добровольского с искрогасительной решеткой. Вид с двух противоположных сторон.
a и b — держащие угольники из латуни; c — медные пластины толщиной 2 мм с расстоянием в свету 1 мм; d — неподвижный цилиндрический контакт; e — круглое отверстие для подвижного контакта; f — шиферная плита (основание); g — катушка магнитного дутья; h — стенки из асбоцемента; i — стальной сердечник катушки магнитного дутья; k — головка стяжного изолированного стержня.

Мы не будем подробно описывать все испытания, которым были подвергнуты аппараты Доливо-Добровольского, и отошлем интересующегося подробностями читателя к статье Ульбриха и Кона. Здесь мы приведем лишь конечные результаты испытаний, которые сведены в табл. III, предварительно указав, что все испытания проводились при напряжении 550 в.

При отключении 230 а трехфазного тока ($\cos \phi < 0,1$) без применения искрогасительной решетки дуга выбрасывалась за пределы аппарата. Применение решетки из 20 латунных пластин позволило надежно, без выбрасывания дуги, разорвать ток 1 200 а. Примене-

ние же еще дополнительно и магнитного дутья позволило разорвать ток 2 200 *a*, т. е. почти в 10 раз больший, чем без искрогасительной решетки.

Таблица III

Род тока и нагрузки	Величина тока и время разрыва дуги	
	Дуга не выходила за пределы решетки	Предельная величина тока, когда пламя выбрасывалось из аппарата
Постоянный ток Переменный ток: а) омическая нагрузка б) $\cos \phi < 0,1$	800 <i>a</i> , 5 <i>мсек</i> 1 300 <i>a</i> , при первом прохождении тока через нуль 1 500 <i>a</i> , при первом прохождении тока через нуль	1 300 <i>a</i> , 23 <i>мсек</i> 1 800 <i>a</i> , при первом прохождении тока через нуль 2 000 <i>a</i> , при первом прохождении тока через нуль

При значительном выбрасывании пламени за пределы аппарата удалось разорвать ток в 5 400 *a*. Таким образом, и трехполюсные выключатели с искрогасительной решеткой показали себя отличными аппаратами.

Кон и Ульбрих особо подчеркивают тот факт, что дуга при индуктивной нагрузке гасится несколько не труднее, чем при омической (следовательно, при наличии деионной решетки чрезвычайно быстро восстанавливалась электрическая прочность промежутка). В деионных выключателях Слепяна было более слабое дутье, и отключение индуктивной нагрузки производилось значительно тяжелее, чем омической.

М. О. Доливо-Добровольский в 1910–1912 гг. еще не мог дать вполне правильного объяснения физическим процессам, происходящим при гашении дуги. Известно, что эти процессы изучаются и в настоящее время. Доливо-Добровольский объяснил гашение дуги охлаждением ее на пластинах и тем обстоятельством, что при дроблении ее на ряд коротких дуг напряжение на каждой частичной дуге становится меньше минимально необходимого для поддержания дуги. Слепян объяснил гашение дуги, описав явление

деионизации дугового промежутка. Но мы не можем, естественно, упрекнуть Доливо-Добровольского в том, что он не дал современного объяснения процессам гашения дуги в его выключателях. Известно, что заслуги исторических деятелей судятся не по тому, чего они не дали сравнительно с современными требованиями, а по тому, что они дали нового сравнительно с своими предшественниками.

Как раз в сравнении с предшественниками Доливо-Добровольский значительно выигрывает. По существу он, не понимая еще сложной физики процессов, дал новый принцип гашения дуги путем использования явлений, происходящих у опорных точек дуги. Предшественники же Доливо-Добровольского для гашения дуги использовали исключительно явления, происходящие в положительном столбе дуги.

Так, М. О. Доливо-Добровольский, намного опередив других изобретателей, положил начало новому направлению в развитии дугогасительных устройств выключателей высокого напряжения. В свое время изобретение Доливо-Добровольского не получило практического применения и было упрятано в сейфы фирмы АЭГ. Это объяснялось согласно более позднему свидетельству сотрудников фирмы [Л. 180] тем обстоятельством, что как раз в тот период начали применять масляные выключатели, и внимание электротехнических фирм целиком переключилось на новый тип выключателя¹.

В настоящее время электропромышленность выпускает многочисленные виды выключателей с использованием искрогасительной решетки, предложенной впервые Доливо-Добровольским. Интересно отметить, что искрогасительная решетка применяется не только в автоматах, контакторах, но также и в рубильниках и разъединителях, что находится в полном соответствии с прямыми указаниями Доливо-Добровольского.

¹ Первые масляные выключатели появились еще в конце прошлого века (выключатели И. Томсона, Ферранти, Броуна и др.), но только с 1908 г. стали строить масляные выключатели с гасительными камерами, способные отключать большие мощности.



М. О. Доливо-Добровольский.

Большой исторический и практический интерес представляет еще одна работа М.О.Доливо-Добровольского, относящаяся к той же области. 23 июля 1914 г. он подал патентную заявку на изобретение: «Методы разрыва электрической дуги и устройство для осуществления этих методов». Заявка была удовлетворена и фирма АЭГ получила патент № 293332.

Сущность изобретения состояла в следующем.

Для того чтобы надежно гасить дугу и предотвратить ее выбрасывание за пределы камеры, Доливо-Добровольский предложил применить дугогасительное устройство, в котором возникающая при размыкании контактов дуга затягивается в сужающуюся щель. По мере своего движения в глубь щели дуга должна была попадать во все более и более сильное магнитное поле и, следовательно, ускорять свое перемещение.

На рис. 6-6 представлены чертежи рассматриваемого патента, и мы будем пользоваться приведенными там обозначениями. Прин-

цип действия устройства ясен из рис. 6-6,а. Здесь цифрой 1 обозначен U-образный электромагнит с катушкой 2. В точке 4, изображающей след одного из контактов, возникает дуга, которая под действием магнитного поля начинает перемещаться слева направо и по мере нарастания ее скорости интенсивно охлаждается и рвется. Для того чтобы дуга не попадала на катушку 2, предусматривается перегородка 3 из изоляционного огнеупорного материала. Перегородка обладает большой теплоемкостью, что еще в большей степени способствует охлаждению дуги. Стенки камеры могут быть выполнены в форме, изображенной пунктиром 5; тогда дуга перемещается вместе со своими основаниями.

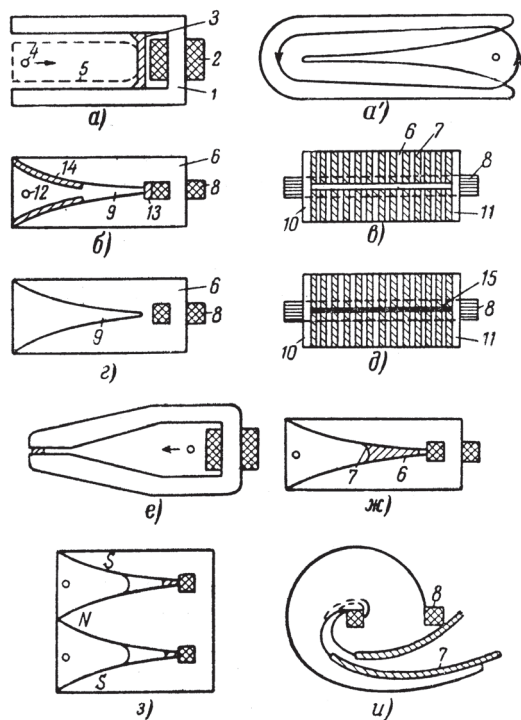


Рис. 6—6. Дугогасительные решетки, действующие на принципе затягивания дуги в узкую щель, образованную в пакете из металлических и изоляционных пластин.

Но устройство, изображенное на рис. 6-6, а, не дает наилучшего результата. Более совершенные конструкции схематически показаны на следующих рисунках, причем рис. 6-6, в является другой проекцией рис. 6-6, б и г. Так, на рис. 6-6, б и в изображено дугогасительное устройство, состоящее из пакета стальных пластин 6, чередующихся с пластинами 7 из изоляционного материала, например слюды. Цифрой 8 обозначена катушка магнитного дутья. В пакете пластин сделана глубокая сужающаяся щель 9, которая ограничена с боковых сторон пластинами 10 и 11. Последние могут целиком состоять из металла и служить электродами; в этом случае дуга перемещается вместе со своими основаниями. Но эти пластины могут быть изготовлены также из изоляционного материала и иметь отверстия 12, через которые проходят контакты выключателя; в такой конструкции дуга, перемещаясь, увеличивает свою длину, что способствует ее гашению. Если узкая щель не доходит до катушки 8, то перегородка 13 из изоляционного материала может быть устранена (рис. 6-6, в и г). Но зато стенки щели во избежание того, что дуга перебросится на металлические пластины пакета, должны быть обязательно армированы обкладкой 14 (рис. 6-6, б), изготовленной, например, из слюды, асбеста или другого огнеупорного материала.

На рис. 6-6, д показано применение настоящего изобретения для плавкого предохранителя. Здесь все устройство аналогично изображенному на рис. 6-6, б и в, но между пластинами 10 и 11 натянута плавкая вставка 15.

Можно дугогасительное устройство выполнить так, что дуга будет не втягиваться, а выдвигаться в узкую щель, как это изображено на рис. 6-6, е. Недостаток последнего исполнения в сравнении с предыдущим тот, что магнитное поле в щели при той же н. с. катушки будет несколько меньше, так как путь магнитного потока при этом больше.

Это новое изобретение Доливо-Добровольского можно, оказывается, сделать более эффективным, если соединить его с методами гашения дуги, описанными им в предыдущих патентах. Так, например, на рис. 6-6, ж изображено дугогасительное устройство,

аналогичное рис. 6-6,б, но металлические и изоляционные пластины теперь имеют неодинаковый вырез; изоляционные пластины 7, выступая в щель, как бы перекрывают ее и оказываются на пути дуги, движущейся в глубь щели. Можно сделать иначе: изоляционные пластины имеют нормальный вырез, а металлические — меньший. В последнем случае дуга встречает на своем пути металлические пластины и в глубине щели дробится на короткие дуги.

Для двухполюсных выключателей удобно применять устройство, изображенное на рис. 6-6,з, сущность которого ясна из чертежа. Преимущество его состоит в том, что можно использовать лишь одну катушку магнитного дутья и обеспечить меньшее магнитное рассеяние. На рис. 6-6,и показан еще один вариант изготовления дугогасительной камеры, когда ее форма напоминает улитку.

Наконец, во всех указанных выше конструкциях катушка магнитного дутья может быть устранена, и дуга будет затягиваться в узкую щель под действием магнитного поля, созданного самой дугой. Последнее устройство изображено на рис. 6-6,а'. Здесь показана одна из стальных пластин с глубоким вырезом и отмечены след дуги и путь магнитного потока. Магнитные линии, стремясь сократиться, затягивают дугу в узкую щель.

В 1930 г. Слепян сконструировал дугогасительное устройство для масляных выключателей, названное им деионной камерой [Л. 181 и 182]. Эта камера Слепяна не только в принципе (схема рис. 6-6,а), но и во многих деталях повторяла рассмотренное изобретение Доливо-Добровольского. Деионная камера указанного типа получила широкое распространение и при этом преимущественно в масляных выключателях. Известно, например, что фирма Вестингауз установила выключатель с такой деионной камерой на электростанции Боулдер-Дем (напряжение 287 кв, время отключения примерно 0,05 сек). Деионная камера применяется и в отечественных конструкциях выключателей высокого напряжения (ВМ-35, ВМД-35).

Таков был вклад М.О.Доливо-Добровольского в конструкции выключателей высокого напряжения. Мы уже заметили выше, что работы только в одной из областей, к которым приложил свои зна-

ния и изобретательский талант Доливо-Добровольский, могли бы составить мировую славу ученому и инженеру. Но Михаил Осипович не жалел своих сил и энергии для любимого дела и умело использовал свои незаурядные способности, которыми так щедро одарила его природа. Разносторонность его деятельности и вместе с тем его умение проникать в существо явлений можно проиллюстрировать также работами в области электроизмерительной техники.

Быстрое развитие техники переменного тока, начинавшаяся массовая электрификация промышленности и транспорта требовали создания совершенных конструкций технических электроизмерительных приборов. Лабораторные приборы, которые были созданы вплоть до середины 80-х годов, не удовлетворяли производственным требованиям. При достаточной точности они были слишком непрочными и ненадежными и не могли применяться в качестве щитовых приборов на электростанциях и тем более в заводских условиях. М.О.Доливо-Добровольский со студенческой скамьи вынес убеждение в необходимости усовершенствования электроизмерительных приборов и в течение всей своей практической деятельности периодически возвращался к электроизмерительной технике.

Первая его работа в этой области была выполнена еще в 1887–1888 гг. 21 апреля 1888 г. он подал патентную заявку на новые конструкции вольтметра и амперметра и получил германский патент № 46093 и английский патент № 9907. Предметом изобретения явилась одна из первых¹ конструкций электромагнитного измерительного прибора.

Принцип действия приборов М.О.Доливо-Добровольского легко пояснить при помощи схематических чертежей (рис. 6–7). Fig. 1 изображает соленоид, обтекаемый измеряемым током. В центре соленоида и перпендикулярно к его оси установлена на кернах ось *A*, на которой укреплен пучок коротких тонких стальных проволок *S*. С этой же осью связана стрелка *Z*. Противоб действующий момент создается

¹ До этого получил распространение только электромагнитный прибор Гуммеля.

противовесом или пружинкой. Fig. 2 и 3 иллюстрируют принцип действия прибора в том случае, если применяется лишь одна проволока $I-I$. В магнитном потоке соленоида проволока намагничивается и при этом возникает пара сил, перемещающая стрелку вправо по шкале. Вращающий момент зависит от напряженности поля соленоида, а следовательно, от измеряемого тока. Предельный угол поворота подвижной системы в этом случае ограничен тем положением, в котором проволока устанавливается параллельно магнитному потоку (Fig. 3). Чтобы расширить шкалу, можно укрепить еще проволоку II (Fig. 4 и 5) или вообще взять лучок проволоки.

Этот прибор обладал по крайней мере тремя преимуществами по сравнению с прибором Гуммеля. Во-первых, вес подвижной системы был чрезвычайно мал, т. е. чувствительность прибора была выше. Во-вторых, тонкие проволоки позволяли легко отрегулировать прибор таким образом, чтобы получить практически любую шкалу (в определенных пределах). В-третьих, что особенно подчеркивал Доливо-Добровольский, при измерениях практически до нуля сводилась погрешность от гистерезиса. Проволоки настолько тонки, что они уже в слабом поле насыщались и их магнитное состояние не зависело от дальнейших изменений намагничивающего тока. Почти полное отсутствие потерь в стальных проволоках имело еще и то значение, что показания прибора были практически одинаковы при измерениях как переменного, так и постоянного токов. Последнее было особенно важным, если учесть, что градуировка всех приборов производилась исключительно на постоянном токе.

Этот прибор Доливо-Добровольского был весьма чувствителен, точен, но так же, как и его предшественники, мало пригоден для технических целей и применялся только в лабораторной практике. Амперметры и вольтметры по указанным патентам Доливо-Добровольского выпускались некоторое время фирмой АЭГ [Л. 183], но только до тех пор, пока Доливо-Добровольский не изобрел новую, более совершенную конструкцию электромагнитного прибора.

Эти новые приборы были описаны в «ETZ» [Л. 184], в справочнике Э. Киттлера [Л. 183] и во многих других источниках.

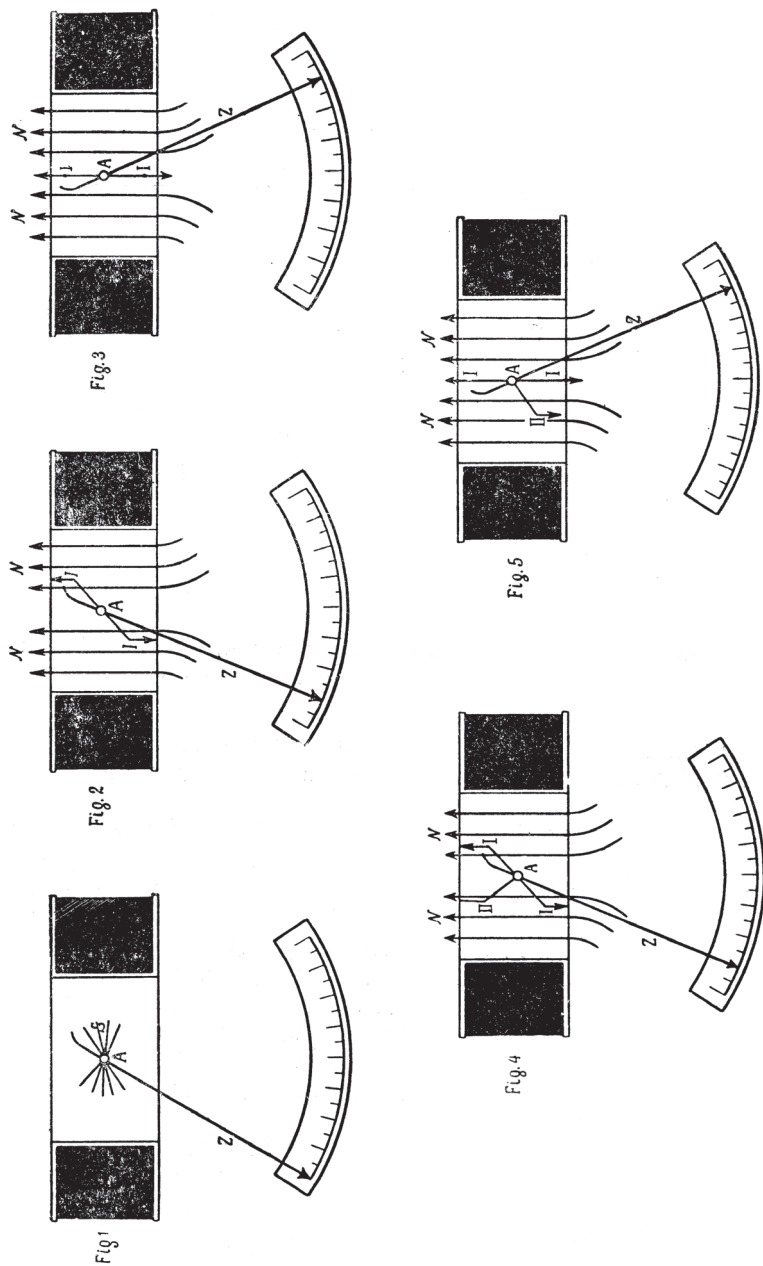


Рис. 6—7. Первая конструкция электромагнитных измерительных приборов М.О.Доливо-Добровольского.

Схематически электромагнитные приборы (амперметры и вольтметры) Доливо-Добровольского представлены на рис. 6-8. Здесь обозначены: *a* — соленоид, витки которого обтекаются измеряемым током; *b* — бронзовый кронштейн, на котором на кернах установлена ось *c*. На оси укреплены регулировочные грузики *d*, стрелка *f*, перемещающаяся по шкале *g*, и подвешен стальной сердечник *e*. Этот сердечник для увеличения тягового усилия свивается из тончайших стальных проволочек и никелируется против окисления. Сердечник представляет наиболее деликатную часть прибора: его вес составляет всего 0,04 г.

Изменяя длину сердечника или глубину его погружения в соленоид, можно получить любую желаемую шкалу. Последняя у вольтметров устроена так, чтобы градуировка была наиболее редкой в области номинального напряжения, тогда как у амперметра шкала делалась, по возможности, равномерной. К вольтметрам прилагался набор из шести дополнительных сопротивлений для измерения более высоких напряжений. Обмотка вольтметра была выполнена из медной и никелиновой проволоки (для температурной компенсации), и потребление прибора составляло всего 1–4 *вт*. Обмотка амперметров для больших токов изготовлялась из медных колец, которые в определенных местах разрезались и спаивались друг с другом (спираль).

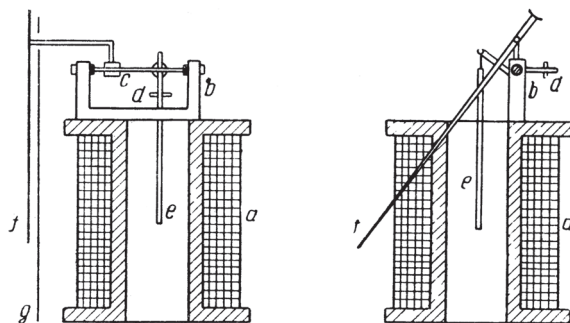


Рис. 6—8. Вторая конструкция электромагнитных измерительных приборов М.О.Доливо-Добровольского.

В то время особенно подчеркивались следующие достоинства этих приборов: независимость показаний от времени включения прибора, почти полное отсутствие влияния внешних полей на показания прибора (сердечник находится целиком внутри достаточно сильного поля соленоида), наименьшее сравнительно со всеми известными к тому времени техническими приборами собственное потребление энергии, применимость как для постоянного, так и для переменного токов.

Амперметры и вольтметры системы Доливо-Добровольского строились в удобных корпусах с четкой, хорошо видимой издалека шкалой (рис. 6-9) и завоевали хорошую репутацию. Фирма АЭГ организовала крупносерийное производство таких приборов, и они тысячами распространялись во многих странах мира.

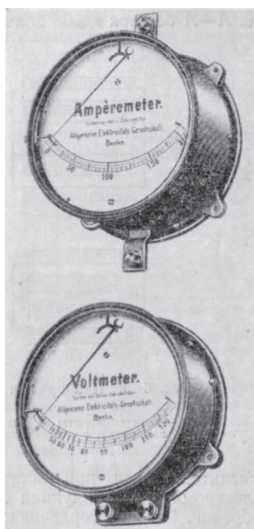


Рис. 6—9. Приборы системы М.О.Доливо-Добровольского.

Для того чтобы более глубоко изучить вопросы, связанные с экономичностью работы трансформатора, Доливо-Добровольский, как мы в свое время отмечали, занялся глубокими исследованиями потерь в пакетах листовой стали. До этого были известны некоторые

методы определения магнитной проницаемости и построения кривых намагничивания стали (методы Эдисона, Юинга, Эйкмейера, Штейнметца и др.). Но эти методы не были совершенными и даже наиболее глубокие исследования потерь в стали, выполненные Юингом, учитывали потерь на вихревые токи.

М. О. Доливо-Добровольский, приступая к указанным исследованиям, разработал новый, ваттметровый метод измерения потерь в стали и сконструировал необходимый для этого прибор [Л. 185].

Испытуемый образец, состоящий из определенного числа полос стали, проложенных бумагой, вставляется между двумя электромагнитами. Сердечники электромагнитов также набраны из листовой стали (рис. 6-10,а). Сечение испытуемого образца $A-A$ берется вдвое большим сечения сердечников электромагнитов. Тогда при встречном включении обмоток обоих электромагнитов индукция в сердечниках равна индукции в образце. Сечение сердечников электромагнитов в приборе Доливо-Добровольского составляло 24 см^2 , а каждая катушка имела 70 витков (сопротивление обеих катушек при последовательном их соединении — $0,044\text{ ом}$).

Электромагниты с образцом включаются на регулируемое напряжение по схеме рис. 6-10,б. При испытаниях образца переключатель B находится в левом положении. Меняя напряжение, вменяют возбуждение электромагнитов и при этом для каждого напряжения, измеряемого тепловым вольтметром Кардью, замеряют потребление мощности ваттметром W . Амперметр (электродинамометр) служит для определения величины тока, необходимой в том случае, если хотят учесть потери напряжения в меди обмоток. Последние обычно исчезающе малы, и ими можно пренебречь. Имеющее место некоторое магнитное рассеяние также не вызывает существенной погрешности в измерениях.

После того как сняты показания приборов, переходят к вычислениям, основанным на принципах, которые Доливо-Добровольский изложил на Франкфуртском конгрессе. Напряжение, показываемое вольтметром, уравнивается падением напряжения в обмотках электромагнитов и противо-э. д. с. При определенных частоте и чис-

ле витков можно считать, что напряжение является мерой магнитного потока (или магнитной индукции в сердечнике). Действительно: $U = E + ir$, где ir — падение напряжения в обмотке. Как указывалось, падением напряжения ir можно пренебречь. Тогда $U \approx E = 4,44 f \omega \Phi$ и $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{U}{4,44 f \omega S} = \text{const} \times U$.

Теперь остается определить, какая часть общих потерь в пакетах стали приходится на образец. Для этой цели последний вынимается из прибора, сердечники электромагнитов специальным приспособлением стягиваются друг с другом (рис. 6-10,а) и переключатель B перемещается в правое положение (рис. 6-10,б). Проводятся те же измерения, что и прежде, для различных напряжений. Результаты измерений наносятся на график в виде кривых рис. 6-11. Здесь кривая A изображает суммарные потери в стали сердечников электромагнитов и образца (пересчитанные на 1 кг), кривая C — потери в сердечниках электромагнитов без образца и разность кривых A и C дает искомые потери на 1 кг испытуемого пакета стали в зависимости от магнитной индукции (кривая D).

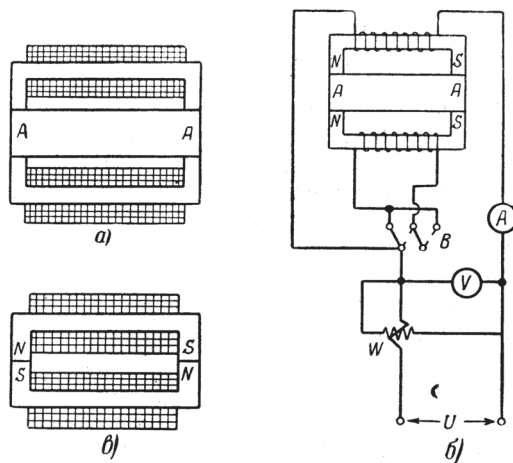


Рис. 6—10. Прибор для измерения потерь в пакетах листовой стали.
а — электромагниты с испытуемым образцом А-А; б — схема измерений; в — электромагниты без испытуемого образца.

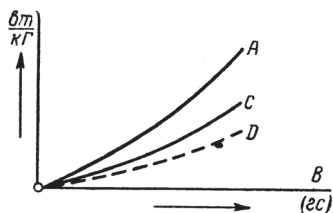


Рис. 6—11. Кривые потерь в пакетах листовой стали.

Доливо-Добровольский нашел, что в полученные ранее Юингом величины потерь в пакетах стали следует ввести поправочный коэффициент от 1,6 до 1,7 для различных сортов стали. Кривые потерь, построенные Доливо-Добровольским, являлись наиболее точными и были оставлены впоследствии только в связи с переходом на более высококачественные марки сталей.

Главным достоинством аппарата Доливо-Добровольского являлась его простота и возможность при его помощи очень быстро исследовать пробу от любого листового материала.

Как известно, в 1900 г. был предложен для измерения потерь в пакетах стали так называемой прибор Эпштейна. [Л. 186]. Этот прибор ни в чем принципиальном не отличался от прибора Доливо-Добровольского (на что, впрочем, указывал в свое время и сам Эпштейн), но тем не менее получил необычно широкое распространение под наименованием «прибора Эпштейна». Только в последние годы авторы некоторых историко-технических работ напоминали о заслугах М.О.Доливо-Добровольского в этой области [Л. 52 и 64].

Развитие техники трехфазного тока позволило Доливо-Добровольскому сделать в 1894 г. следующее меткое замечание: «Современная техника переменного тока может быть по праву названа техникой разности фаз» [Л. 18]. Везде, где приходилось иметь дело с трехфазными машинами, трансформаторами, в сетях трехфазного тока неизбежно сталкивались с необходимостью определения коэффициента мощности, т. е. $\cos \phi$. Пользуясь известным методом разложения тока на две составляющие («ваттную» и «безваттную») и обычными электроизмерительными приборами, можно было путем

соответствующих расчетов определить угол сдвига фаз и «безваттный» ток. Но, конечно, было бы значительно удобнее иметь измерительный или в крайнем случае индикаторный прибор, который непосредственно указывал бы величину фазного сдвига или хотя бы обнаруживал его и показывал его знак. Это в первую очередь было необходимо для контроля и регулирования работы синхронных генераторов на электрических станциях. Оператор часто не мог предотвратить выпадение из синхронизма машин только потому, что он не мог быстро заметить неравномерность нагрузки параллельно работающих генераторов и связанный с этим большой уравнильный ток между ними.

В 1892 г. Доливо-Добровольский изобрел измерительный прибор, который он назвал фазометром или измерителем реактивного тока. Правда, термин «реактивный» тогда не употреблялся и Доливо-Добровольский, распространив понятие «безваттный ток» и на емкостную составляющую, ввел новый термин «ленивый ток» или «свободный ток» — «Leerstrom». Для удобства мы везде в дальнейшем будем пользоваться современными терминами — «реактивный ток», «реактивная мощность» и т. д.

На свой новый прибор Доливо-Добровольский получил германский патент № 68215 от 14 апреля 1892 г. и английский патент № 23113 от 15 декабря 1892 г. Публичное сообщение об этом приборе Доливо-Добровольский сделал на заседании Электротехнического общества 22 мая 1894 г. [Л. 18].

Действие прибора основано на принципе асинхронного двигателя, т. е. на использовании свойств вращающегося магнитного поля (рис. 6-12). Если по двум взаимно-перпендикулярным катушкам протекают два тока с определенной разностью фаз, то на расположенный внутри катушек металлический диск начинает действовать вращающий момент (Fig. 1). Противодействующий момент может быть создан противовесом или спиральной пружинкой. Вращающий момент будет максимальным, когда катушки расположены под вполне определенным углом друг к другу, а именно, когда угол между осями катушек составляет $\phi + 90^\circ$, если ϕ — угол фазного сдвига в градусах.

Прибор может быть устроен, например, так, как показано на Fig. 2 (рис. 6-12). Здесь имеется неподвижная катушка $a-a$ и подвижная $b-b$. Противодействующий момент создается пружиной F . Когда по катушкам протекают два тока, отличающиеся один от другого по фазе, диск S приходит в движение, и степень его отклонения от нейтрального положения указывается на градуированных шкалах стрелками z . Начнем поворачивать катушку $b-b$ до тех пор, пока отклонение стрелок $z-z$ на шкалах T не станет наибольшим. В этот момент угол между катушками a и b соответствует определенному значению фазного сдвига ϕ . Этот угол указывается на основной шкале T' . Таким образом, этот оригинальный прибор показывал непосредственно фазный сдвиг и, следовательно, был фазометром. Следует отметить, что погрешности такого прибора были, конечно, велики.

Другие модификации этого прибора представляли собой измерители реактивной мощности. Рассмотрим Fig. 3. Здесь обе катушки расположены под углом 90° друг к другу (катушки выполнены сведенными). Если одна катушка имеет мало витков и включается в цепь тока I , а другая большое число витков и включается между проводниками на напряжение U , то при постоянной частоте вращающий момент будет:

$$D = aUI \sin \phi.$$

Если напряжение неизменно, то $D = bI \sin \phi = bI_r$, т. е. прибор становится измерителем реактивного тока.

Но такой же прибор может быть использован в качестве индикатора, указывающего сдвиг фаз и его знак, так как направление момента изменяется в зависимости от того, является ли угол емкостным или индуктивным.

Прибор может иметь и другие исполнения. Так, в приборе, показанном на Fig. 4, для усиления момента введен стальной сердечник, а противодействующий момент обеспечивается грузиком g . В приборе Fig. 5 противодействующий момент возникает в результате взаимодействия постоянного магнита и кусочка стали V , укрепленного на диске S . На Fig. 6 изображен прибор, в котором используется электро-

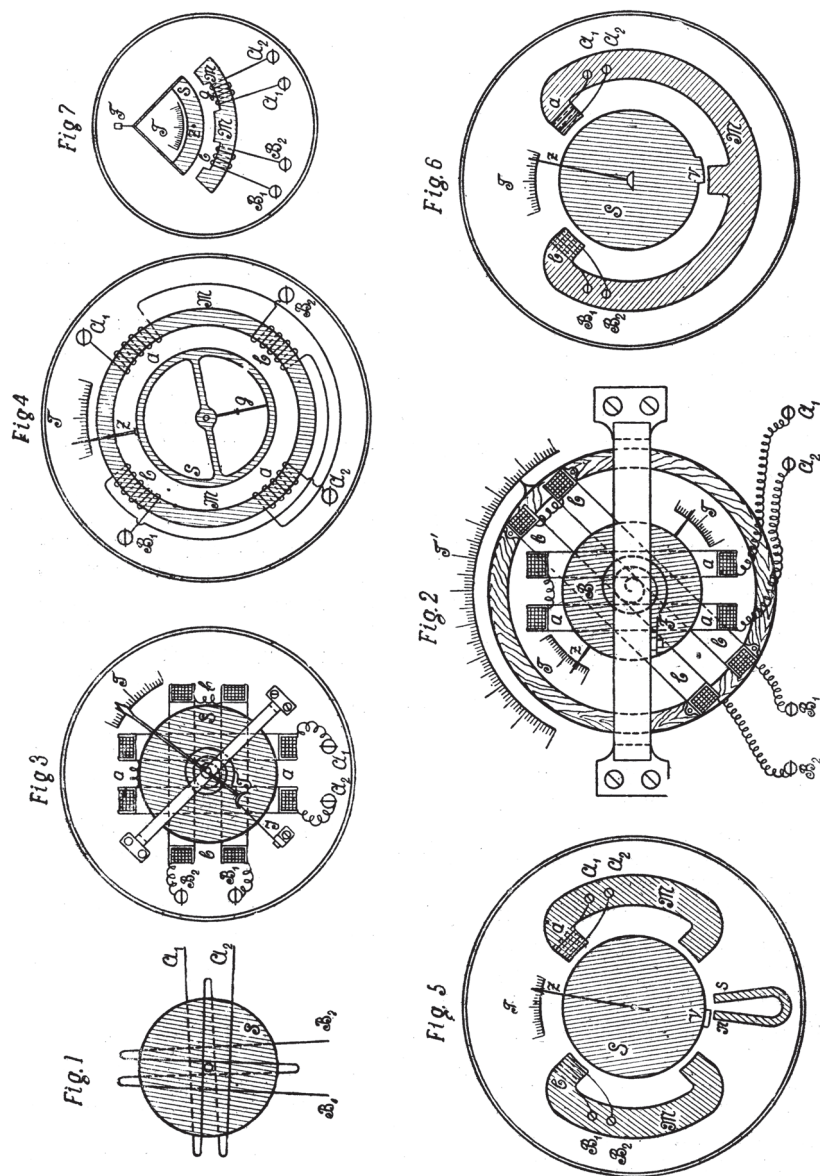


Рис. 6—12. Фазометры и измерители реактивной мощности.

магнитная противодействующая сила. В последнем случае является очень удобным то, что противодействующий момент изменяется пропорционально намагничивающим (т. е. измеряемым) токам. Благодаря этому можно отрегулировать прибор так, что вращающий момент практически не будет зависеть от тока и будет пропорциональным только $\sin \phi$, т. е. шкала может быть отградуирована для значений $\cos \phi$. На Fig. 7 изображен прибор, в котором диск заменен частью плоского кольца, подвешенного на пружинке F .

В своем докладе [Л. 18] Доливо-Добровольский указывал, что «свое важнейшее применение описанный фазометр или лучше измеритель реактивного тока находит для центральных станций с параллельно работающими машинами однофазного или трехфазного тока...»

Использование в этом случае измерителя реактивного тока, а точнее, пожалуй, индикатора фазного сдвига Доливо-Добровольский описал в английском патенте № 23113. На заимствованном из этого патента рис. 6-13 обозначено: D — синхронный генератор; E — возбудитель; $I-I'$ — провода; R — потребители; P — фазоиндикаторный прибор, последовательная обмотка которого включена в провод I' , а параллельная — между точками $d-d'$. При неизменных величинах напряжения и тока нагрузки показания прибора пропорциональны коэффициенту мощности.

Если два генератора, работающие на общие шины (рис. 6-13), находятся в нормальном установившемся режиме, т. е. возбуждение каждого генератора при данном напряжении на шинах и заданной частоте строго соответствует подводимой к нему от первичного двигателя мощности, то оба фазоиндикаторных прибора показывают только фазный сдвиг, обусловленный нагрузкой. Но как только режим работы генераторов нарушится (например, у одного генератора увеличится возбуждение), по шинам и обмоткам генераторов потечет уравнивающий ток. Приборы немедленно покажут не только наличие фазного сдвига, вызванного уравнивающим током, но и его знак. При этих условиях оператору не составит никакого труда тотчас же определить, в какую сторону и у какого генератора следует изменить возбуждение.

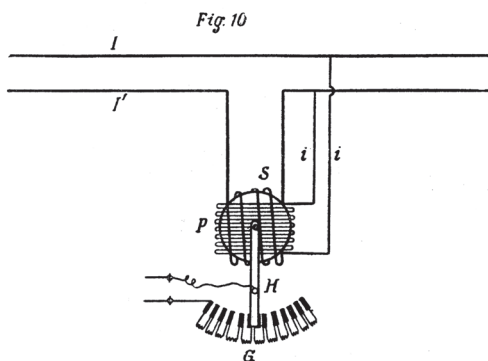
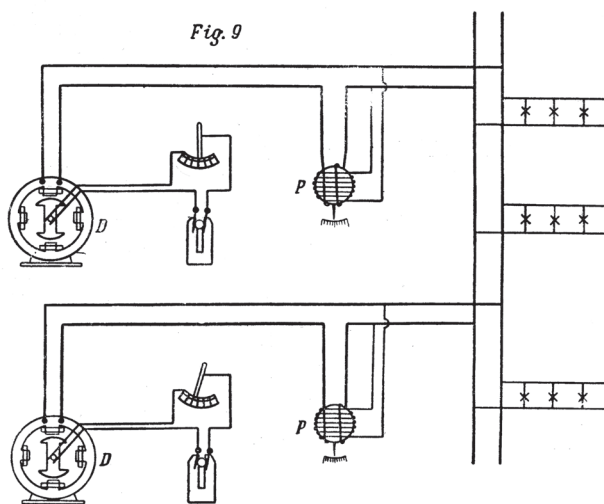
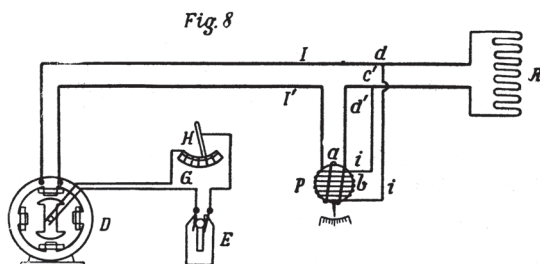


Рис. 6—13. Применение фазоиндикаторных приборов для регулирования параллельной работы генераторов.

Доливо-Добровольский даже предусмотрел возможность автоматизации регулирования возбуждения. На нижней схеме показано, как можно использовать для этой цели фазоиндикаторный прибор: с диском S механически связан рычаг H , осуществляющий переключение секций сопротивления в цепи возбуждения. При помощи такого же прибора легко осуществить и отключение одного из генераторов: постепенно уменьшается подводимая к генератору мощность и одновременно понижается возбуждение, причем правильность операций контролируется по показаниям прибора. Доливо-Добровольский указал, кроме того, что при помощи этих приборов можно без труда установить оптимальное возбуждение синхронных двигателей, благодаря чему достигается снижение тока и потерь в линии.

Фирма АЭГ выпускала приборы Доливо-Добровольского в очень большом количестве, и в свое время без них не мыслилась ни одна электростанция. Как известно, фазометры и измерители реактивной мощности являются обычными щитовыми приборами и на современных электрических станциях. Следует подчеркнуть пионерский характер этой работы М.О.Доливо-Добровольского, поскольку он разработал конструкции первых технических индукционных измерительных приборов или, как тогда говорили, приборов, построенных на принципе Феррариса.

В настоящее время мало известно, что первые стрелочные частотомеры были созданы тоже по идее М.О.Доливо-Добровольского [Л. 187]. Принцип действия таких приборов он сообщил австрийскому электрику Густаву Мейеру, который в то время как раз был занят конструированием частотомера. В приборе Мейера использовалось тепловое линейное расширение стальной проволоки, помещенной в переменное магнитное поле соленоида. По обмотке соленоида протекал ток, частоту которого хотели измерить, а один конец натянутой проволоки был механически связан с призмой, отбрасывавшей световой луч на шкалу. Путем особых расчетов по отклонению луча можно было определить частоту тока. Прибор Мейера был сложным и очень чувствительным к механическим и прочим посторонним влияниям. В 1897 г. Г. Мейер подробно опи-

сал свой прибор и вместе с тем дал полное описание частотомеров М.О.Доливо-Добровольского [Л. 187].

Один частотомер Доливо-Добровольского был основан на том же принципе, что и измеритель реактивной мощности. Прибор состоял из двух взаимно-перпендикулярных катушек, внутри которых помещался медный диск (рис. 6-14). При протекании по катушкам двух токов, отличающихся один от другого по фазе, но одинаковых по частоте, на диск действует вращающий момент. Противодействующая сила создается спиральной пружинкой F . С диском связана стрелка, перемещающаяся по шкале. Величина отклонения стрелки пропорциональна частоте токов, их произведению и синусу угла фазного сдвига ($D = cfI_1I_2 \sin \phi$). Фазный сдвиг токов можно получить путем включения в цепь одного тока индуктивной катушки или конденсатора, а в цепь другого тока — омического сопротивления. Если величины токов в обеих катушках и фазный сдвиг между ними неизменны, то вращающий момент будет зависеть только от частоты ($D = c'f$), и шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в герцах.

Иной была вторая конструкция частотомера. Электромагнит (рис. 6-15) имел воздушный зазор клиновидной формы. Следовательно, магнитное сопротивление сердечника в каждом его про-

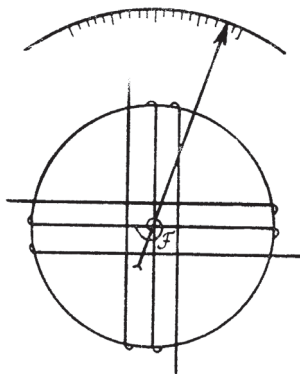


Рис. 6—14. Схема первого стрелочного частотомера М.О.Доливо-Добровольского.

дольном сечении было различно в зависимости от величины зазора; изменялась и величина магнитной индукции в зазоре, уменьшаясь с его расширением. Обмотка C электромагнита включалась в цепь тока, частота которого должна быть измерена (включение может быть параллельным или последовательным в зависимости от того, в каком режиме работает цепь: при постоянном напряжении или при постоянном по величине токе).

Принцип действия этого частотомера может быть объяснен следующим образом. В связи с тем, что количество стали на пути потока по его сечению не одинаково (в правой части, согласно рис. 6-15, *а*, больше), то и потери в стали постепенно увеличиваются по мере сужения воздушного зазора. Эти потери вызывают фазный сдвиг магнитного потока, который также увеличивается по мере сужения зазора. В медном диске, введенном частично в зазор, индуцируются токи и, так же как в обычном индукционном счетчике, благодаря их взаимодействию с потоками, имеющими различные фазы, создается вращающий момент. Диск стремится повернуться в сторону более узкой части зазора. Противодействующий момент создается спиральной пружинкой, а с диском, как и в предыдущем приборе, связана стрелка. Вращающий момент при постоянной величине тока в обмотке электромагнита пропорционален частоте этого тока.

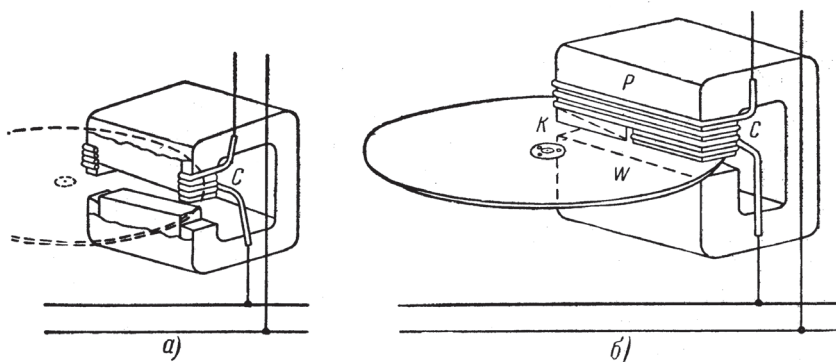


Рис. 6—15. Стрелочные частотомеры М.О.Доливо-Добровольского.

Неравномерность магнитного потока, а следовательно, и сдвиг фаз между отдельными частями потока Доливо-Добровольский создавал также несколько отличным от указанного выше способом. В полюсном выступе P (рис. 6-15,б) делался вырез (перпендикулярно плоскости катушки), и на одной из двух частей полюсного выступа размещался дополнительный виток W основной обмотки C . Тогда поток в этой части полюсного выступа был несколько больше, чем в другой. Кроме того, чтобы повысить надежность прибора, на второй части полюсного выступа делался скос (пунктир K).

Доливо-Добровольский не запатентовал эти изобретения по той простой причине, что принцип действия первого прибора ничем не отличался от принципа действия уже запатентованного им измерителя реактивной мощности, а конструкция приборов второго типа напоминала известную конструкцию электрического счетчика (например, счетчика Келли и Стенли, описанного в германском патенте № 81310). И в том и в другом случае Доливо-Добровольский использовал известные уже принципы для того, чтобы связать показания приборов с другим параметром электрического тока, а именно с частотой.

Доливо-Добровольский постоянно интересовался развитием электроизмерительной техники, особенно, конечно, если дело касалось измерений в сетях трехфазного тока. В 1896 г. он выступил в печати с критикой метода измерения мощности трехфазного тока, предложенного Бен-Эшенбургом [Л. 22], указывающего в своей статье [Л. 188] на трудности измерений мощности в сетях трехфазного тока без нулевого провода, которые усугубляются при несимметричной нагрузке. Тем не менее, как сообщал автор статьи, и для этого случая ему удалось найти метод измерения мощности при помощи одного ваттметра. На рис. 6-16 представлена схема Бен-Эшенбурга, из которой видно, что последовательная катушка ваттметра включена в фазу I , а параллельная катушка $S1$, имеющая весьма малое сопротивление, включена через большие добавочные сопротивления r .

М. О. Доливо-Добровольский отметил, что схема Бен-Эшенбурга, безусловно, весьма полезна для измерений мощности в сетях с дви-

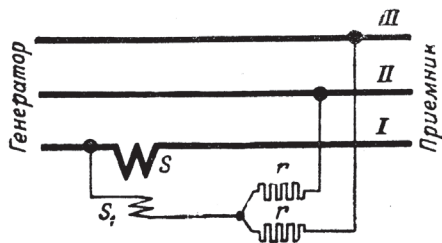


Рис. 6—16. Схема измерений мощности, предложенная Бен-Эшенбургом.

гательной нагрузкой, т. е. там, где нагрузка симметрична. Но эта схема не годится для несимметричной нагрузки. Действительно, говорит Доливо-Добровольский, это становится ясным, если представить себе, что нагрузка включена только между проводами II и III. Провод I в этом случае окажется без тока, и ваттметр не покажет никакого отклонения¹.

М. О. Доливо-Добровольский занимался вопросами электроизмерительной техники как бы попутно со своими основными работами в области электрических машин. Но по мере того, как он все более и более погружался в дела машиностроительного завода, а специализация в электротехнике все углублялась, вопросы электроизмерительной техники внутри фирмы постепенно перешли целиком в ведение доктора Бенишке. Однако спустя полтора десятка лет М. О. Доливо-Добровольский вновь обратился к этой области электротехники.

Дело в том, что углублявшаяся специализация в электротехнике на первоначальном этапе неизбежно вызывала отрыв одной ее отрасли от другой и порой теории от практики. Электроизмерительная техника далеко шагнула вперед в точности приборов, но почти совершенно упустила при этом из виду промышленных потребителей. Последним требовались не столько точные, сколько прочные и дешевые приборы. Доливо-Добровольский сообщает о курьезном

¹ Схема Бен-Эшенбурга легко может быть улучшена, если ввести так называемую искусственную нулевую точку [Л. 52].

факте, когда точный лабораторный ваттметр установили прямо на электроمولотилке. Можно себе представить, каковы были показания прибора через несколько часов работы!

«Что пользы нам в достижении высокой точности прибора, если эта точность *практически недостижима*, или если получаются в результате абсурдные показания просто из-за отсутствия знания измерительной техники и неумелого обращения?» Этот вопрос поставил Доливо-Добровольский в Электротехническом обществе 22 октября 1912 г. в своем докладе на тему: «Об использовании железа в электрических измерительных приборах» [Л. 35].

Доливо-Добровольский указал на необходимость создания технических и одновременно достаточно точных приборов. «Я, напротив,ставляю положение, — говорит он, — что нет необходимости лишаться точности для того, чтобы получить прочный технический прибор, надо лишь освободиться от известных предрассудков или, мягко говоря, от известного школярства...».

Прежде всего в технических измерительных приборах следует делать более прочной подвеску подвижной системы. Доливо-Добровольский иронически замечает, что едва ли могут иметь практическое значение (имеется в виду применение в промышленности) приборы, керны которых, покоящиеся в драгоценных камнях, разрушаются от малейшего удара или сотрясения.

Однако усиление подвески неизбежно приведет к снижению точности. Для того чтобы это снижение не было слишком заметным, следует, по убеждению Доливо-Добровольского, значительно увеличить вращающий момент путем смелого введения в магнитное поле прибора больших количеств стали. Максимальный момент, который раньше удавалось получить в измерительных приборах, составлял всего 0,1 *Гсм*, и при этом на сталь в этих приборах приходилась самая малая часть веса всей системы.

«Вкладывать много железа в измерительный прибор» — это звучит, вероятно, как нечто еретическое, однако, я покажу, что предубеждение против железа неправомерно», — заявил Доливо-Добровольский. Поскольку наибольшая потребность ощущалась в технических

ваттметрах, то он решил продемонстрировать справедливость своих идей на новой конструкции именно этого прибора.

Было бы удобно, отмечает изобретатель, для ваттметра использовать вращающееся магнитное поле, т. е. так называемый принцип Феррариса. Но желание иметь прибор, пригодный как для постоянного, так и для переменного токов, привело Доливо-Добровольского к конструкции нового типа прибора, которому он дал название *ферродинамического* (рис. 6-17). По своему виду его магнитопровод напоминает машину постоянного тока.

Доливо-Добровольский указывает, что были попытки и раньше ввести сталь в электродинамические приборы, в основном для экранирования от посторонних магнитных влияний. Но эти конструкции, предложенные Бенишке, Лотцом и Сьюмпнером, были неудачны, а Сьюмпнер даже объявил, что попытки ввести сталь в измерительные приборы безнадежны.

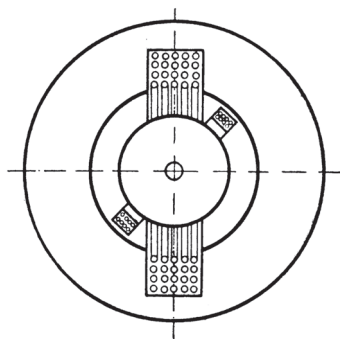


Рис. 6—17. Принципиальная конструктивная схема ферродинамического прибора.

Главным недостатком введения стали является уменьшение точности прибора вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов. Потери в стали вызывают сдвиг фаз между намагничивающим током и магнитным потоком. Погрешность от этого сдвига фаз нужно было компенсировать при помощи сложных устройств, и поэтому предпочитали отказываться от введения в прибор стали.

Способ устранения указанной погрешности и принцип конструкции ферродинамического ваттметра Доливо-Добровольский описал в германском патенте № 235913, заявленном 27 ноября 1909 г.¹

Фазный сдвиг в ферродинамическом приборе зависит не только от величины потерь в стали, но и от отношения этих потерь ко всей мощности возбуждения. Если величина магнитной энергии системы велика по сравнению с потерями в стали, то погрешность будет незначительной.

Величина магнитной энергии в единицу времени определяется мощностью возбуждения неподвижной катушки. Если хотят иметь погрешность, например, менее 1 % при $\cos \phi = 0$, то необходимо удовлетворить условию

$$\frac{EI}{P_{\Delta}} \geq 100,$$

где EI — мощность возбуждения, а P_{Δ} — потери в стали.

Предмет изобретения Доливо-Добровольского состоит в том, что предлагается одновременно увеличивать воздушный зазор в магнитной цепи и мощность возбуждения.

Если увеличить н. с. катушки, например, вдвое, и воздушный зазор увеличить таким образом, чтобы сохранилась прежняя величина магнитного потока, то вращающий момент подвижной катушки и чувствительность прибора останутся теми же самыми. Но, поскольку количество стали осталось примерно прежним, то и потери в ней почти не изменятся. Между тем при удвоенной н. с. примерно удвоится и э. д. с. катушки возбуждения, а следовательно, и мощность возбуждения. Таким образом, отношение $\frac{EI}{P_{\Delta}}$ удвоится, а фазный сдвиг и погрешность (при $\cos \phi = 0$) будут составлять лишь половину прежнего значения.

¹ Патент выдан на фирму АЭГ, однако в многочисленных источниках есть указания на авторство М.О.Доливо-Добровольского (см. например [Л. 189]). Кроме того, содержание патентного описания, будучи сравнено с рассмотренным докладом М.О.Доливо-Добровольского, не оставляет никаких сомнений относительно его автора.

Увеличивая, таким образом, одновременно н. с. неподвижной катушки и воздушный зазор, можно получить в определенных границах любую сколь угодно малую погрешность. Следовательно, от прежней традиции: уменьшать количество стали и мощность возбуждения (реактивную), – следует отказаться. Новый принцип – это снижение активной мощности по сравнению с реактивной.

Если приведенное выше соотношение удовлетворено, то конструктивная форма прибора может иметь различные модификации. Так, магнитопровод может быть выполнен подковообразным, овальным или кольцевым с одной или несколькими катушками возбуждения и т. д.

Прибор, построенный по принципу Доливо-Добровольского, обладает еще и тем преимуществом, что его показания в определенных границах не зависят от частоты тока. При изменении частоты изменяются одновременно и числитель и знаменатель указанного выше соотношения. При понижении частоты потери в стали снижаются даже несколько быстрее, чем мощность возбуждения, так как потери на вихревые токи изменяются пропорционально квадрату частоты (а потери на гистерезис, как и мощность возбуждения, пропорциональны первой степени частоты). Следовательно, при понижении частоты точность прибора даже повышается. При постоянном токе (частота равна 0) прибор имеет весьма хорошие характеристики.

В своем докладе [Л. 35] М.О.Доливо-Добровольский подробно показал, что при введении воздушного зазора снижается также и погрешность, вызываемая остаточной индукцией в стали.

На рис. 6-18 цифрой 1 обозначена петля гистерезиса замкнутого магнитопровода. Причиной погрешности прибора является большая величина остаточной индукции B_r , созданной коэрцитивной силой F_c . Для снижения погрешности нужно уменьшить величину остаточной индукции. Это как раз и удастся сделать благодаря введению воздушного зазора, тогда петля гистерезиса принимает вид кривой 2, а остаточная индукция уменьшается до величины B'_r . Теперь доля н. с., приходящаяся на сталь, невелика в сравнении

с полной величиной н. с. Подбирая соответствующую величину воздушного зазора, можно практически в любых желаемых пределах снижать остаточную индукцию и вызываемую ею погрешность. В выполненном приборе Доливо-Добровольского остаточная индукция составляла всего 0,5 % максимальной индукции. Фазная ошибка в том же приборе составляла 0,3 %, что для технического прибора вполне допустимо (хотя и эта погрешность может быть легко устранена введением небольшой индуктивности). И это в то время, как вес стали в приборе составлял 300 г!

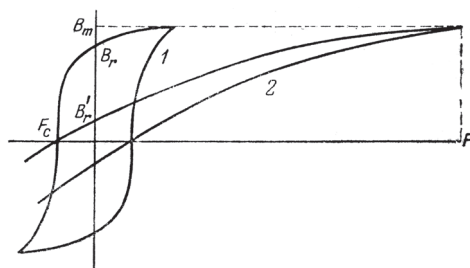


Рис. 6—18. Гистерезисные петли замкнутого магнитопровода и магнитопровода с воздушным зазором.

Ферродинамический ваттметр М.О.Доливо-Добровольского был сконструирован весьма компактно, удачно и даже в наше время выглядит вполне современным (рис. 6-19). Вес подвижной системы ваттметра составлял около 4 г, потребление мощности токовой катушкой — 2,4 *вт*, а катушкой напряжения — 0,015 *вт*. Подвижная система была установлена на цапфах. Шкала прибора была равномерной. Невольно возникает самый важный вопрос: какова же была величина вращающего момента? Ведь слабость вращающего момента, да еще, пожалуй, чувствительность к внешним магнитным полям (магнитобоязнь), были главными недостатками электродинамических приборов. Вращающий момент в первом приборе Доливо-Добровольского составил 0,8 *Гсм*, т. е. был примерно в 8 раз больше, чем в ранее строившихся приборах. Для регистрирующего прибора, по мнению Доливо-Добровольского, можно было вращающий момент

увеличить до 30 Гсм. Излишне, по-видимому, напоминать, что ферродинамические приборы практически не боятся внешних магнитных полей, а будучи примененными в качестве щитовых приборов, они оказываются значительно точнее индукционных.

Достоинства ферродинамических приборов очевидны современным электрикам. Впрочем, они были очевидны и сразу же после выступления Доливо-Добровольского. Его смелый шаг вперед, его новаторский почин, сопряженный с ломкой установившихся традиций, поразил воображение современников. Оказывается, «много стали» — это еще не значит «большая остаточная индукция» [Л. 35], это еще не значит, что прибор стал неточным, плохим! Ферродинамические приборы вызвали у специалистов сначала некоторое мимолетное чувство недоверия, быстро, однако, уступившее место чувству благодарности к выдающемуся изобретателю. Вскоре эти приборы получили необыкновенно большое распространение, особенно в качестве регистрирующих [Л. 190].

Следует отметить, что М.О.Доливо-Добровольский настоятельно рекомендовал исследовать также вопрос о введении стали в элек-

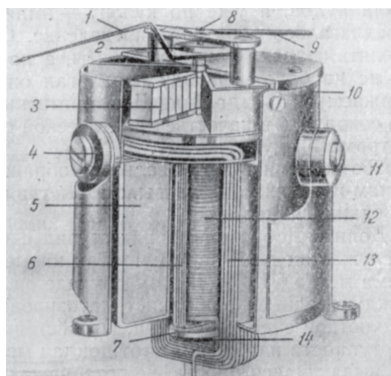


Рис. 6—19. Ферродинамический ваттметр М.О.Доливо-Добровольского.
 1 — стрелка; 2 — верхняя пружина; 3 — крыло успокоителя;
 4 — болт крепления; 5 — ярмо магнитопровода; 6 — подвижная катушка; 7 — нижняя пружина; 8 — верхний подпятник; 9 — установка на нуль; 10 — камера успокоителя; 11 — изоляция; 12 — стальной сердечник; 13 — неподвижная катушка; 14 — нижний подпятник.

тромагнитные приборы для того, чтобы и в этих приборах увеличить вращающий момент и сделать более прочной подвеску подвижной системы.

Доливо-Добровольский значительное внимание уделял метрологическим вопросам. Он в совершенстве изучил все, в то время многочисленные, системы измерений и нередко выступал со своим собственным, вполне обоснованным мнением по различным вопросам электрических измерений.

Впервые по вопросам метрологии Доливо-Добровольский выступил в печати в мае 1893 г. со статьей «К вопросу об узаконении электрических единиц измерений» [Л. 16]. Эта работа была вызвана приближением срока открытия Чикагского международного конгресса электротехников, одним из центральных вопросов повестки дня которого был вопрос об узаконении международных электрических и магнитных единиц¹.

Доливо-Добровольский как инженер-практик выступил за большую четкость и простоту определений единиц. В частности, он подверг критике предлагавшиеся (в основном Госпиталье) определения единиц сопротивления, тока, напряжения, мощности, емкости и пр. Следует отметить, что принципиальных разногласий с проектом единиц (впоследствии почти полностью принятым) у Доливо-Добровольского не было. Он, как практик, например, полагал более целесообразным определять единицу сопротивления по длине столба ртути и его поперечному сечению, а не по длине и массе. Предлагавшееся им определение казалось более логичным и более соответствовавшим практическим представлениям о сопротивлении, всегда связывавшимися с длиной проводника и его поперечным сечением. На возможные возражения относительно трудностей точ-

¹ На Чикагском конгрессе были приняты международная единица самоиндукции, названная генри, и международная единица сопротивления — международный ом (сопротивление столба ртути, имеющего высоту 106,3 см и массу 14,4521 г), а также выработаны правила для изготовления нормального элемента и нормального вольтметра — прибора, служившего для измерения тока [Л. 191].

ного измерения сечения он отвечал, что для практиков совершенно безразлично, как измеряют сечение — непосредственно микрометрическим винтом или косвенно путем взвешивания.

В отношении определения единицы тока он предлагал определить сначала кулон, а уже по кулону — ампер, тогда как в проекте предлагалось обратное определение. Он предлагал также определять сначала единицу работы, а по ней единицу мощности, а не наоборот; фараду предлагал определять как емкость, заряжаемую 1 в до 1 к. Для магнитных измерений он предлагал сохранить в качестве практической системы абсолютную электромагнитную систему.

В конце работы Доливо-Добровольский обращался ко всем электротехникам-практикам с призывом выступить в защиту практических единиц измерений.

В 1899 г. Доливо-Добровольский выступил с большим докладом для служащих АЭГ на тему: «Так называемая „абсолютная система мер“» [Л. 28]. В этом докладе он на основании принятых международных правил систематизированно изложил существо абсолютной системы единиц. По обстоятельности, научности и доступности изложения этот доклад может рассматриваться как выдающаяся работа, не потерявшая своей ценности для понимания основ электротехники до настоящего времени.

Следующей метрологической работой Доливо-Добровольского явился доклад, сделанный им 6 апреля 1910 г. также для служащих АЭГ. Тема доклада: «Как измерить электрический ток?» [Л. 33]. В этом докладе он в популярной форме дал обстоятельный обзор как единиц измерений, так и основных электроизмерительных приборов.

Едва ли найдется читатель, который, познакомившись с описанными выше работами М.О.Доливо-Добровольского в области электроаппарато- и приборостроения, не поддастся чувству восхищения и не отдаст еще раз дань уважения многогранности и глубине изобретательского таланта выдающегося инженера.

«РАБОТАЙ, НЕЗРИМО, ЧУДЕСНО.
РАБОТА, КАК СЕВ, ПРОРАСТЕТ.
ЧТО СТАНЕТ С ПЛОДАМИ, —
БЕЗВЕСТНО. —
НО БЛАГОСТНО ВЛАГОЙ НЕБЕСНОЙ
ТРУД ВСЯКИЙ ПАДЕТ НА НАРОД».

В.Брюсов

ГЛАВА VII

ПРОЧИЕ РАБОТЫ

М.О.ДОЛИВО-

ДОБРОВОЛЬСКОГО.

ПОСЛЕДНИЙ ПРОГНОЗ

Методы защиты линий связи от индуктивного влияния со стороны линий сильного тока. Система Г — Д с машинами последовательного возбуждения. Жидкостный реостат. «Делитель напряжения». Прогноз возможностей электропередачи постоянным током.

В предыдущих главах мы познакомились с крупными комплексными работами М.О.Доливо-Добровольского. Эти работы легко разделить на определенные группы, каждая из которых составляла отдельную страницу в творческой биографии ученого-изобретателя и в известном смысле эпоху в истории электротехники. Но Михаил Осипович выполнил также ряд других работ, представлявших собой частные решения некоторых конкретных задач электротехнической

практики и выходивших за пределы того круга вопросов, который интересовал его в первую очередь.

Среди такого рода работ представляет несомненный интерес исследование М.О.Доливо-Добровольским методов защиты линий связи от индукционного влияния линий электропередачи. Эта проблема, актуальная и в настоящее время, особенно глубоко волновала электротехников и связистов в конце прошлого века. Мы помним, что это был период сооружения первых линий передачи энергии переменным током, и все лица, в той или иной степени причастные к службе телеграфно-телефонной связи, были серьезно обеспокоены возможными нарушениями работы линий слабого тока. Проводились многочисленные эксперименты и устраивались бурные дискуссии, которые должны были ответить на вопрос о допустимом расстоянии между линиями сильного и слабого тока. Работники связи составляли проекты законов и инструкций, которые должны были диктовать энергетикам определенные условия, ставившие последних в весьма затруднительное положение.

М. О. Доливо-Добровольский, пионер техники трехфазного тока, не мог, конечно, остаться в стороне от этих жарких дискуссий. В течение 1892 г. он несколько раз выступал в Электротехническом обществе со своими замечаниями и предложениями по этому вопросу [Л. 192].

В качестве одного из средств защиты однопроводной линии связи от мешающего влияния линии сильного тока Доливо-Добровольский предложил использовать переходный телефонный трансформатор. Этот способ предлагал Нил для защиты телефонных линий от влияния телеграфных линий еще в 1884 г. Теперь Доливо-Добровольский нашел возможным применить его для защиты от влияния линии сильного тока. Следует отметить, что переходный телефонный трансформатор применяется для той же цели и в настоящее время [Л. 193].

Доливо-Добровольский предложил также использовать для защиты индукционное влияние самой силовоточной линии [Л. 11]. На рис. 7-1 буквами АВ обозначен провод линии сильного тока,

а ab — телефонная однопроводная линия с телефонными аппаратами T . Если в определенном месте и в ту и в другую линии включить катушки S и s таким образом, что индуктируемый в катушке ток имеет противоположное направление току, индуктируемому в линии ab , то регулированием взаимного расположения катушек S и s можно добиться полного устранения мешающего влияния сильноточной линии. Модель такого устройства Доливо-Добровольский демонстрировал 7 марта 1892 г. на заседании Электротехнического общества в Берлине, а самому методу он дал название «собственная защита обыкновенных телефонных проводов».

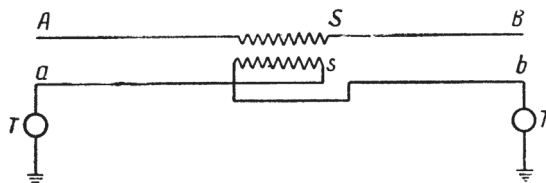


Рис. 7—1. Схема «собственной защиты» телефонной линии от индуктивного влияния линии сильного тока.

М. О. Доливо-Добровольский не считал предложенные им методы панацеей. Он понимал, что возникшая проблема сложна и требует глубокого, всестороннего и длительного изучения. Выступая в Электротехническом обществе, он ставил перед собой лишь две задачи: во-первых, побудить специалистов к дальнейшим исследованиям и, во-вторых, опровергнуть утверждение некоторых связистов о невозможности хорошей защиты линий связи от мешающего влияния линий сильного тока.

К тому периоду, когда М. О. Доливо-Добровольский только начал работать на заводах АЭГ, относятся некоторые его работы, связанные с машинами постоянного тока. Одним из интереснейших его изобретений является схема электрического привода на постоянном токе с жесткой механической характеристикой. Это изобретение Доливо-Добровольский демонстрировал весной 1890 г. Гисберту Каппу, из книги которого мы и заимствуем интересующие нас сведения [Л. 194].

В конце 80-х годов многие электротехники (Капп, Броун и др.) пытались разработать такую схему электропривода, которая обеспечивала бы примерно постоянную скорость при значительных изменениях нагрузки. Решением этой проблемы занялся и Доливо-Добровольский. Схема Доливо-Добровольского представлена на рис. 7-2. В левой части схемы мы видим генератор последовательного возбуждения, в правой части — двигатель последовательного возбуждения (цифры означают величины сопротивления в омах соответствующих обмоток). Каждая машина имела мощность 20 *квт* при номинальном токе генератора 25 *а*. Обе машины имели почти одинаковые параметры. Обмотка возбуждения генератора была шунтирована большим омическим сопротивлением, которое, по объяснению Доливо-Добровольского, не только позволяло подкорректировать характеристику машины, но и служило демпфером при колебательных процессах, возникавших при резких изменениях нагрузки. В схеме также предусматривался рубильник *S*, позволявший шунтировать обмотку возбуждения генератора перед отключением двигателя.

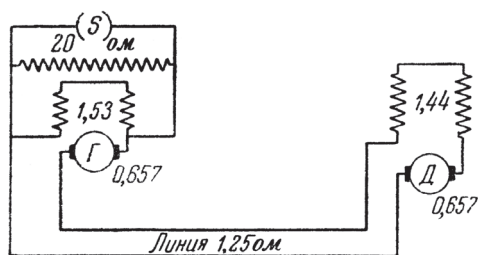


Рис. 7—2. Система генератор — двигатель с машинами последовательного возбуждения.

Из современной теории электропривода известно, что естественная механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением имеет вид кривой 1 (рис. 7-3), а характеристика холостого хода генератора с последовательным возбуждением — вид кривой 2. При малой нагрузке на двигателе напряжение генератора,

определяемое общим током цепи, т. е. током нагрузки, тоже мало. Этому положению соответствует определенная скорость двигателя. По мере увеличения нагрузки возрастает и напряжение на генераторе, и при соответственно подобранных параметрах машин скорость двигателя почти не зависит от нагрузки (кривая 3). Таким образом, достигается автоматическое регулирование скорости при изменениях нагрузки.

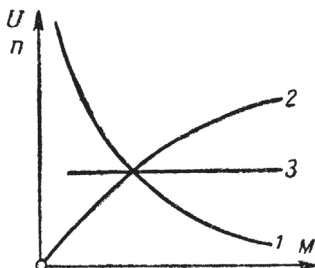


Рис. 7—3. Характеристики генератора и двигателя последовательного возбуждения, работающих в системе Г — Д.

Капп свидетельствует [Л. 194], что саморегулирование в установке Доливо-Добровольского было весьма совершенным во всем практическом диапазоне изменения нагрузки (ток нагрузки от 5 до 25 а).

В процессе дальнейшего развития производственных механизмов и совершенствования электропривода возникли новые схемы регулирования приводных электродвигателей. Так, большое распространение получила система генератор — двигатель (Г — Д) с машинами независимого возбуждения, описанная в 1892 г. Леоном Леоном [Л. 195]. Схема М.О.Доливо-Добровольского впоследствии была забыта и только в последнее время она вновь стала применяться для привода металлорежущих станков небольшой мощности¹. В современных схемах обычно вместо постоянного шунтирующего сопротивления в цепи возбуждения генератора применяют реостат,

¹ Схему М.О.Доливо-Добровольского иногда несправедливо называют «сериесной схемой Леонарда».

позволяющий получать семейство довольно жестких механических характеристик.

В той же книге [Л. 194] Капп описал разработанную М.О.Доливо-Добровольским конструкцию жидкостного пускового реостата, предназначенного для включения в цепь якоря машины постоянного тока (рис. 7-4). Несколько сосудов заполнялось пятипроцентным содовым раствором, и в каждый из сосудов опускался металлический электрод A (A' — вид этих электродов сбоку). Посредством рейки и шестерни траверсу, на которой укреплялись электроды A , легко можно перемещать вверх и вниз. Когда траверса опущена вниз до упора, замыкаются призматические контакты и провод B шунтирует реостат. Для напряжений до 200 в Доливо-Добровольский изготовлял реостаты с двумя сосудами, а для напряжения до 800 в — реостаты с четырьмя сосудами, Как мы видели выше¹, впоследствии такая конструкция реостата пригодилась ему в связи с изобретением асинхронного двигателя с фазным ротором.

К числу наиболее ранних работ М.О.Доливо-Добровольского в области электрических машин относится его любопытное изобретение, направленное на уменьшение вихревых токов в стали машины и искрообразования на коллекторе. Патент на это изобретение был заявлен 19 октября 1888 г. и выдан в июле следующего года под номером 47757².

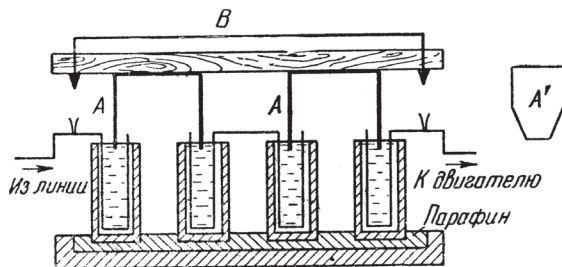


Рис. 7—4. Жидкостный пусковой реостат М.О.Доливо-Добровольского.

¹ См. гл. 3.

² Патент выдан на фирму и об авторстве М.О.Доливо-Добровольского мы узнаем из других источников, в частности, из книги Деттмара [Л. 106].

Сущность изобретения состояла в следующем. Для устранения возможных пульсаций магнитного потока, вызывающих вихревые токи, предлагалось вводить в воздушный зазор машины тонкостенный стальной цилиндр. На рис. 7-5,а и 7-5,б показано применение такого цилиндра для двухполюсной и многополюсной машины. Чтобы избежать слишком большого ослабления рабочего магнитного потока, т. е. добиться того, чтобы основная часть его проходила через якорь, а не по цилиндру, в стенках этого цилиндра рекомендовалось высверливать ряд отверстий, линия которых совпадала с нейтральной зоной машины (рис. 7-5,в).

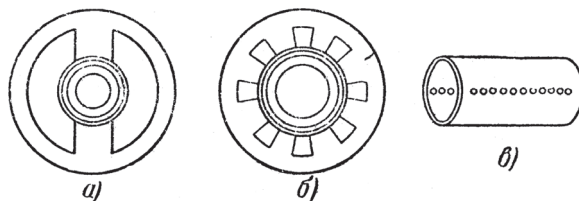


Рис. 7—5. Стальной цилиндр, вводимый в воздушный зазор машины.

По утверждению изобретателя подобное устройство должно было способствовать также уменьшению искрообразования на коллекторе. Надо полагать, что здесь речь может идти об искрообразовании, возникающем в связи с неравномерным распределением индукции в воздушном зазоре и связанном с этим повышением напряжения между соседними коллекторными пластинами.

Описанное изобретение получило некоторое применение [Л. 196], однако уже вскоре от него отказались, поскольку эффект, полученный в связи с его внедрением, был не столь значительным, чтобы компенсировать резкое увеличение магнитного рассеяния в машине. Кроме того, и условия коммутации в машине должны были, по-видимому, ухудшиться.

Из изобретений М.О.Доливо-Добровольского, относящихся к области техники постоянного тока, пожалуй, наиболее остроумным и получившим наибольшее распространение явился так называемый



М. О. Доливо-Добровольский.

мый «делитель напряжения». На это изобретение он получил германский патент № 73892 от 27 апреля 1893 г. и английский патент № 19423 от 16 октября 1893 г. С соответствующим сообщением он выступил в июне 1894 г. на Втором годовом собрании Союза германских электротехников [Л. 17].

Выше, в гл. 1, мы отмечали, что в целях увеличения радиуса электроснабжения в 80-х годах прошлого столетия стали применяться трехпроводные сети постоянного тока. Но существенным недостатком трехпроводной системы в том ее виде, в каком ее предложил Гопкинсон, являлась необходимость устанавливать два генератора. Были сделаны попытки построить трехпроводную сеть с одним генератором, но установки получались громоздкими и неэкономичными. Так, в одних случаях для того, чтобы разделить напряжение, применяли два соединенных последовательно двигателя (предложение В. Сименса), т. е. фактически увеличивали число машин. В других случаях применяли аккумуляторные батареи, требовавшие большого внимания и ухода. Необходимость применения для деления напряжения вращающихся машин и аккумуляторов заставляла порой отказываться от трехпроводной сети вообще.

М. О. Доливо-Добровольский изобрел «делитель напряжения», представлявший собой простой в изготовлении, дешевый статический аппарат. Принцип действия его можно уяснить из рис. 7-6 английского патента. На левой схеме условно изображен генератор с кольцевым якорем, причем для того, чтобы не усложнять чертежей, щетки b^1 и b^2 расположены не на коллекторе, а непосредственно на обмотке якоря (что в принципе, конечно, ничего не меняет). От двух диаметрально противоположных точек обмотки якоря сделаны отводы, между которыми включается катушка со стальным сердечником e . При вращении якоря между указанными точками существует переменное напряжение и, следовательно, через катушку должен течь переменный ток. Но катушка обладает большим индуктивным сопротивлением, и переменный ток в ней имеет незначительную величину. Между тем эта катушка не представляет существенного сопротивления для постоянного тока. Легко заметить, что напряжение между левой щеткой b^1 и средней точкой катушки будет всегда

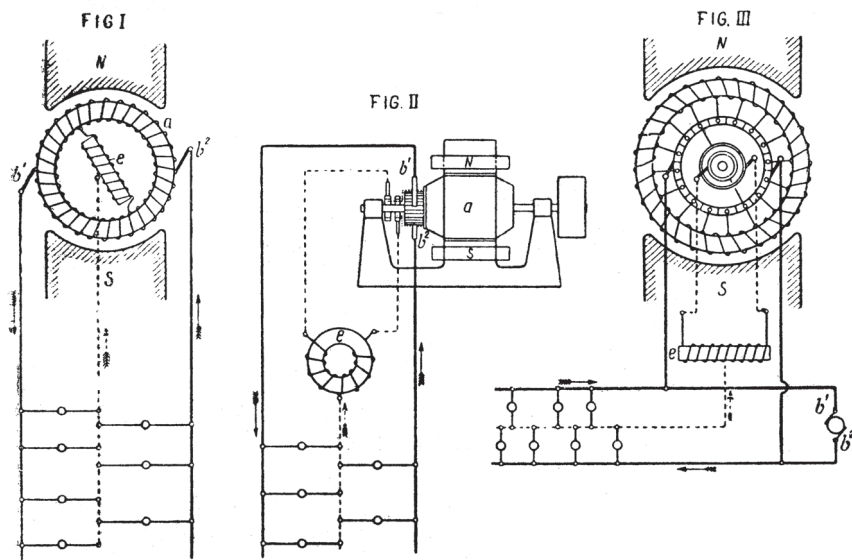


Рис. 7—6. Делитель напряжения М.О.Доливо-Добровольского.
Принципиальные схемы.

равно напряжению между правой щеткой и той же средней точкой. Следовательно, к этой средней точке катушки может быть присоединен средний провод трехпроводной системы. Тогда цепь каждой половины сети постоянного тока оказывается замкнутой через индукционную катушку.

Конструктивно индукционную катушку удобнее вынести за пределы машины и для увеличения ее индуктивного сопротивления сердечник выполнить замкнутым. На средней схеме рис. 7-5 показано, как это осуществляется практически: к щеткам, скользящим по коллектору машины, присоединяются крайние, главные провода трехпроводной линии, а катушка *e* присоединяется к щеткам, скользящим по кольцам, которые соединены с двумя диаметрально противоположными точками обмотки якоря.

Индукционная катушка *e* и представляла собой «делитель напряжения» Доливо-Добровольского.

Интересное решение предложил М.О.Доливо-Добровольский для того случая, когда возможно устройство подстанции, следовательно, когда было бы желательно и возможно не прокладывать третий, нейтральный провод между электростанцией и подстанцией. Он рекомендовал на подстанции установить машину, работающую в режиме двигателя (одну машину, а не две, как в схеме Сименса), и свой «делитель напряжения». На правой схеме рассматриваемого рисунка показаны все соединения для этого случая. От генераторной станции, имеющей на шинах двойное напряжение, идут два провода к подстанции, на которой установлены двигатель и «делитель напряжения» (изображены в крупном масштабе). От подстанции отходит трехпроводная сеть.

В некоторых случаях несимметрия нагрузки двух ветвей трехпроводной сети может быть столь значительной, что ток в уравнительном проводе заметно возрастет и вызовет большое падение напряжения. Ясно, что при этом, несмотря на точное разделение напряжения на станции или на подстанции, напряжения на зажимах потребителей в разных ветвях трехпроводной сети будут неодинаковы. Если сеть питалась по схеме Гопкинсона, т. е. от двух генерато-

ров, то делу легко было бы помочь, изменив соответственно напряжения на зажимах генераторов. В схемах с «делителем напряжения» этого сделать нельзя. Поэтому Доливо-Добровольский предложил включить последовательно в цепь уравнильного провода небольшую машину добавочного напряжения. Принцип действия как машины добавочного напряжения, так и трехпроводной сети с этой машиной не требует особых пояснений.

«Делители напряжения» Доливо-Добровольского, о внешнем виде которых можно судить по рис. 7-7, применялись во всех развитых в промышленном отношении странах до тех пор, пока существовали трехпроводные сети постоянного тока. О степени распространения такого рода сетей в конце прошлого столетия свидетельствуют следующие примеры: в 90-х годах в Швейцарии из 45 электростанций постоянного тока 18 распределяли энергию по трехпроводной системе, во Франции — 50 из 260, в Англии — 4 из 49 [Л. 197]. Были электростанции с делителями напряжения Доливо-Добровольского и в России, где также нашла себе применение трехпроводная система постоянного тока. Например, «делители» Доливо-Добровольского были установлены в 1896 г. в Казани, в 1900 г. — в Новочеркасске, в 1903 г. — в Вятке.

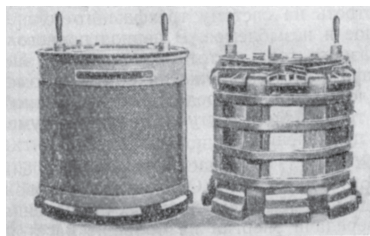


Рис. 7—7. Делитель напряжения М.О.Доливо-Добровольского. Внешний вид.

Многие известные электрики, из которых работами одних руководил научный интерес, а других — патентно-правовые соображения, пытались найти иную конструкцию делителя напряжения. Среди этих изобретателей были: Гопкинсон, Лэмм, Осанна, Деттмар и Ротерт и др. [Л. 198]. Но никому из них не удалось создать более

простое, надежное, экономичное и вместе с тем эффективное устройство, чем «делитель» М.О.Доливо-Добровольского.

По роду своей деятельности на заводах АЭГ М.О.Доливо-Добровольскому приходилось заниматься многими другими вопросами электротехники. В своих публичных выступлениях он также касался многих проблем, высказывал оригинальные мысли и делал различного рода замечания. Так, он неоднократно выступал по вопросам, связанным с теорией и конструированием машин постоянного тока. Его постоянно занимали проблемы реакции якоря и коммутации, определения потерь в активных материалах и улучшения этих материалов. Он участвовал в обсуждении и таких вопросов, как электробезопасность различных установок, уменьшение падения напряжения в рельсах электрических железных дорог [Л. 31], исследование электрической дуги при переменном токе [Л. 199] и т. д.

Достойным и логическим завершением огромного труда, проделанного М.О.Доливо-Добровольским в течение трех десятилетий, явился его замечательный последний научный прогноз. Речь идет о предсказанной им возможности и целесообразности при сооружении сверхдальних линий передач вновь вернуться к постоянному току. Вернуться на более высоком техническом уровне.

Известно, что основным трудом жизни М.О.Доливо-Добровольского являлись разработка и развитие во всех деталях системы трехфазного тока. Но он был далек от того, чтобы, увлекшись развитием своего детища, потерять всякое чувство меры и смотреть на систему трехфазного тока, как на нечто универсальное и незыблемое. В период полного расцвета техники трехфазного тока, в тот период, когда энергия передавалась трехфазным током уже на сотни километров при напряжениях до 100 кВ, и передававшиеся мощности достигали 50 000 кВт, творец этой системы сумел определить границы ее применения.

26 ноября 1918 г. в переполненном конференц-зале Электротехнического общества М.О.Доливо-Добровольский выступил с докладом на тему: «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния» [Л. 39].

В самом начале доклада Доливо-Добровольский говорил: «Я ставлю вопрос о том: останется ли система трехфазного тока высокого напряжения для будущих электропередач единственно правильной. Другими словами: стоим ли мы на правильном пути, останется ли нам только совершенствовать детали и увеличивать размеры, чтобы «завоевать мир»? Думаю, — нет... Я вижу возможность реванша для постоянного тока, который многому научится у техники переменного тока».

Этот неожиданный для слушателей вывод докладчик обосновал следующими аргументированными соображениями. Прежде всего, уже в конце второго десятилетия текущего столетия было очевидно, что в дальнейшем нельзя будет ограничиваться передачей энергии на одну-две сотни километров. Запасы угля в местах, близких к энергоемким центрам, не являются неисчерпаемыми, а источники гидравлической энергии часто бывают удалены на многие сотни километров. Кроме того, Доливо-Добровольский не мог ограничивать область технического прогресса территориальными рамками западноевропейских стран. Он видел впереди неизбежный прогресс колониальных и полузависимых стран и, нужно думать, никогда не забывал о необъятных просторах своей родины. Нельзя не привести здесь следующие слова его: «Можем ли мы, новаторы культуры, ограничивать свое рассмотрение малой протяженностью европейской Германией?.. Можно ли жить лишь сегодняшним днем, подготавливать сегодня лишь то, что мы используем непосредственно завтра?» И, заглядывая в будущее, Доливо-Добровольский приступил к анализу явлений, которые возникнут при передаче электроэнергии, например, на 1 000 км!

Емкостный ток линии передачи возрастает с увеличением ее длины и тем более, чем выше напряжение. Этот ток при сверхдальних передачах будет настолько понижать к п. д. линии, что его уже не удастся ничем компенсировать. Оказывается, что хорошо известный из техники электропередачи постоянным током закон, утверждавший, что потери в линии обратно пропорциональны квадрату напряжения, при применении переменного тока становится неверным. Качественную оценку этому явлению М.О.Доливо-Добровольский

дает при помощи векторной диаграммы (рис. 7-8). При напряжении U_1 в линии течет ток I_1 , активная и реактивная составляющие которого построены на диаграмме. Увеличим напряжение вдвое, тогда при $U_2 = 2U_1$ активная составляющая тока I_2 будет вдвое меньше, но примерно вдвое возрастет реактивная составляющая. При дальнейшем увеличении напряжения реактивная составляющая превысит активную, и потери в линии будут расти. Поэтому, если иметь в виду только потери в линии, наивыгоднейшим может считаться то напряжение, при котором активная составляющая тока равна реактивной. Но увеличим, например, вдвое протяженность линии. Емкостный ток при этом увеличится, а напряжение не только нельзя повысить, но потребуются даже его понизить для того, чтобы уменьшить реактивную составляющую тока. Однако при этом возрастут потери в линии, которые уже удвоены при увеличении протяженности последней. Остается увеличить сечение провода. Таким образом, потери в линии все же будут большими (низкое сравнительно напряжение), вес проводов будет большим и, кроме того, возрастут индуктивные потери¹.

Емкостный ток линии можно было бы уменьшить, понизив частоту переменного тока. Но это отрицательно отразилось бы на осветительной нагрузке и снизило бы экономичность трансформаторов и машин. Однако уменьшение частоты в пределе приводит к постоянному току.

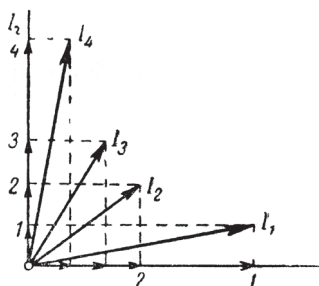


Рис. 7—8. Векторная диаграмма токов в линии электропередачи.

¹ Доливо-Добровольский еще не мог рассматривать работу линии с точки зрения электрической устойчивости передачи, иначе его рассуждения получили бы еще более аргументированный характер.

При передаче постоянным током положение заметно меняется в благоприятную сторону. Для большей убедительности Доливо-Добровольский привел ориентировочный технико-экономический расчет. Он ввел понятие об «электрической стоимости передачи». Эта величина представляла собой произведение процентных потерь мощности в линии и «удельного» веса проводов (на 1 км):

$$A = \frac{\Delta P}{P} \cdot \frac{G}{P} = \frac{\Delta P \cdot G}{P^2}.$$

Проведя некоторые преобразования, Доливо-Добровольский получил следующую формулу:

$$A = \left(\frac{L}{U}\right)^2 + \left(\frac{CUL^2}{P}\right)^2,$$

где

A — «электрическая стоимость»;

L — длина линии;

U — напряжение;

C — емкость на 1 км (в расчете рассматривается как сосредоточенная в конце линии);

P — мощность.

Для постоянного тока второй член суммы равен нулю и получается известное соотношение, согласно которому «электрическая стоимость» остается неизменной, если длина линии и напряжение изменяются одинаково.

При переменном токе высокого напряжения существенное влияние на «электрическую стоимость» оказывает второе слагаемое. Несколько улучшает дело то обстоятельство, что потери, вызываемые емкостным током, понижаются по мере увеличения мощности¹.

¹ Известно, что полная компенсация возможна только при нагрузке, соответствующей так называемой натуральной мощности. При очень длинных линиях устойчивая передача натуральной мощности практически невозможна.

Но, к сожалению, для того, чтобы компенсация была заметной, это увеличение мощности должно быть слишком большим.

Вывод Доливо-Добровольского был следующий: «... по моему мнению, несколько сот километров при напряжениях порядка 200 кВ представляют приблизительно предел для передачи мощности переменным током по воздушной линии при обычной частоте». Эти параметры с современной точки зрения являются, конечно, заниженными, но это ни в коей мере не умаляет важности принципиальной постановки задачи.

М. О. Доливо-Добровольский придавал большое значение передаче энергии по кабельной линии. Постоянный ток в этом отношении был также более благоприятным. При постоянном токе и установившемся режиме отпадают присущие кабельной линии переменного тока недостатки, связанные с индуктивностью, потерями в металлических оболочках кабеля и очень большими потерями в диэлектрике; надежность и безопасность передачи повышаются, толщина изоляции при том же напряжении может быть принята меньшей. В случае постоянного тока становится более эффективной и надежной защита линий и машин; например, для ограничения токов короткого замыкания могут быть установлены реакторы, предельная величина которых определяется только потерями в меди, тогда как при переменном токе существенную роль играет индуктивное падение напряжения в реакторе. Таким образом, будущее электропередачи Доливо-Добровольский видел в применении постоянного тока и кабеля.

Достойным восхищения является тот факт, что еще в 1918 г. Доливо-Добровольский указал в качестве одного из возможных вариантов решения проблемы преобразования трехфазного тока в постоянный применение ртутных выпрямителей! Удивительно велика была способность научного предвидения, которой обладал М.О.Доливо-Добровольский!

Из последних замечаний докладчика можно сделать вывод, что будущая схема электроснабжения представлялась ему следующим образом: генерирование и распределение электроэнергии будет производиться переменным (вероятно, трехфазным) током,

а ее передача на большие расстояния — выпрямленным при помощи вентильных устройств током высокого напряжения. Иначе говоря, линия передачи своими концами должна быть присоединена к преобразовательным подстанциям. Известно, что именно такая схема получает применение в настоящее время.

Доливо-Добровольский в конце своего доклада призвал электротехников объединить свои усилия для решения поставленной проблемы: «Конечно, это новое поле еще слишком мало обработано, — говорил он, — оно требует еще большей предварительной работы, времени и затрат. Но коль скоро мы знаем, что при решении проблемы мы не только будем вознаграждены, но что решение просто необходимо, а при дальнейшем развитии и неизбежно, то я убежден, что решение будет также и найдено. ...Я уже вижу на горизонте намечающееся решение многих частей этой новой проблемы».

Доклад М.О.Доливо-Добровольского произвел впечатление взорвавшейся бомбы: настолько были неожиданными выводы и рекомендации одного из активнейших борцов за торжество техники переменного тока. Этот доклад вызвал замешательство и растерянность среди электротехников. Многие, по-видимому, сочли доклад несерьезным. Такие авторитетные германские специалисты, как РюдЕНБЕРГ или ЗАРФЕРТ, высказались отрицательно относительно идей Доливо-Добровольского [Л. 200]. Однако некоторые электротехники все же поддержали докладчика, правда, предупреждая его о серьезных технических трудностях, которые предстояло разрешить. Но Доливо-Добровольский всегда считал, что нужно не избегать трудностей, а разрешать их упорным трудом.

Изучению проблемы передачи энергии постоянным током Доливо-Добровольский решил посвятить почти все свое время, но этого времени у него, к великому сожалению, оставалось слишком мало: обострившаяся болезнь и преждевременная смерть разрушили грандиозные планы неутомимого новатора.

В полной мере значение последней работы М.О.Доливо-Добровольского можно оценить только в наше время. Рост мощностей

электростанций и дальности электропередач был столь быстрым, что уже в 1920–1922 гг. в США серьезно встал вопрос об устойчивости параллельной работы. Позднее эта проблема стала одной из важнейших в развитии электрических систем во всех странах мира. Глубокое изучение этого вопроса привело к тому, что наряду с другими мерами повышения устойчивости параллельной работы стала рассматриваться и такая радикальная мера, как переход к передаче электроэнергии постоянным током. При всех своих преимуществах электропередача постоянным током обладает теми крупными недостатками, что она, во-первых, требует применения сложных и дорогих специальных аппаратов: выпрямителей и инверторов, и, во-вторых, затрудняет решение задачи о промежуточном отборе энергии. Недостаточная научно-техническая разработка средств преобразовательной техники, необходимых для установок высокого напряжения большой мощности, длительное время задерживала внедрение нового типа электропередачи. Особо актуальной проблема применения постоянного тока стала в последнее время, когда создание крупнейших энергетических систем, таких, например, как единая энергетическая система Европейской части СССР, требует сооружения невиданных по мощности и применяемым напряжениям магистралей для транспорта электроэнергии.

В наше время осуществляется последний прогноз выдающегося электротехника. С 1950 г. в Советском Союзе находится в полупромышленной эксплуатации кабельная линия электропередачи постоянным током Кашира — Москва, по которой передается мощность 30 000 *квт* при напряжении 200 *кв*. С 1954 г. началась промышленная эксплуатация кабельной линии постоянного тока Швеция — Готланд (100 *км*), работающей при напряжении 100 *кв*. Наконец, заданиями Шестого пятилетнего плана предусмотрено сооружение электропередачи постоянного тока, которая свяжет Сталинградскую гидроэлектростанцию с Донбассом.

«ГЛАВНОЕ УДОВОЛЬСТВИЕ ПРИ НАУЧНЫХ ЗАНЯТИЯХ
ДЛЯ МЕНЯ ЗАКЛЮЧАЛОСЬ НЕ В ТОМ, ЧТО
Я ВЫСЛУШИВАЛ ЧУЖИЕ МНЕНИЯ, А В ТОМ, ЧТО
Я ВСЕГДА СТРЕМИЛСЯ СОЗДАТЬ СВОИ СОБСТВЕННЫЕ».

ДЕКАРТ

ГЛАВА VIII

ЛИЧНОСТЬ М.О.ДОЛИВО- ДОБРОВОЛЬСКОГО. ЕГО ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНАЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННО- ТЕХНИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

*Участие в работах Электротехнического общества и Союза германских электротехников. Первый Всероссийский электротехнический съезд.
М.О.Доливо-Добровольский и Петербургский политехнический институт.
Личная жизнь изобретателя. Некоторые научные воззрения и характеристика
производственно-технической деятельности.*

Замечательная изобретательская деятельность М.О.Доливо-Добровольского, конечно, не протекала в «безвоздушном пространстве». Он жил и работал среди своих сотрудников в постоянном общении со специалистами, с производственниками, учеными, рабочими, инженерами и т. д. С сообщениями о своих изобретениях он выступал в общественных организациях, на страницах журналов, участвовал в острых дискуссиях и при всем этом ни на минуту не за-

бывал (да и не мог забыть, даже если бы хотел этого) о своей повседневной производственной деятельности на заводах фирмы АЭГ.

В мае 1889 г. Михаил Осипович вступил в число членов Электротехнического общества в Берлине. Членами этого Общества являлись практически все видные электрики Германии, а также ученые и инженеры некоторых других стран. На заседаниях Общества, регулярно проходивших в просторном конференц-зале здания берлинского почтового отделения № 24 (рис. 8-1), заслушивались и обсуждались доклады членов Общества, правительственные постановления, касающиеся электротехники и связи и другие вопросы.

Уже в ноябре 1889 г. в повестку дня заседания Общества был включен доклад Доливо-Добровольского «О передаче энергии переменными токами», в котором он собирался дать решительный отпор тем скептикам, которые сомневались в экономичности электропередачи переменным током. Но уже подготовленный доклад не был разрешен к зачитанию «из соображений интересов дружественной фирмы» [Л. 37]. Официально же было объявлено, что доклад снимается ввиду болезни докладчика [Л. 201]. А в рукописи этого доклада автор его, между прочим, писал: «Электродвигатели переменного тока

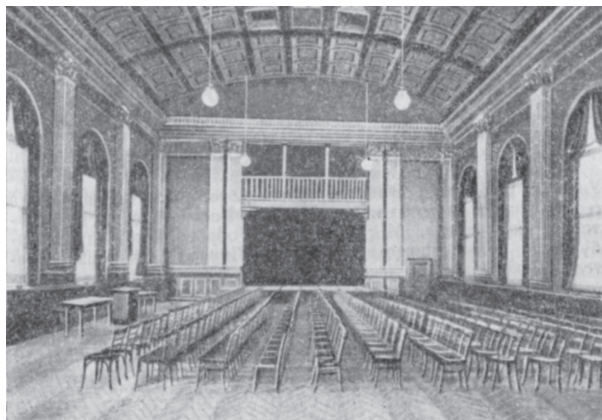


Рис. 8—1. Конференц-зал, в котором проводились заседания Электротехнического общества в Берлине.
Слева — столы председателя и секретаря и трибуна.

не только возможны, но, наоборот, именно там, где нужны электродвигатели, будет применяться предпочтительно переменный ток» [Л. 37].

После этого несостоявшегося доклада М.О.Доливо-Добровольский в течение почти полутора лет лишь 2–3 раза выступал в порядке обсуждения докладов других членов Общества¹. Только 24 марта 1891 г. он выступил с большим сообщением на тему: «Передача энергии посредством переменных токов различных фаз (вращающий ток)», в котором изложил сущность трехфазной системы токов. Нетрудно представить себе то напряженное внимание, тот неподдельный интерес к докладу, которыми сопровождалось это выступление Доливо-Добровольского. Интерес был тем более велик, что слушатели уже кое-что знали о работах докладчика из статьи и сообщения доктора Оскара Мэй [Л. 136 и 141]. Теперь всем, естественно, хотелось услышать о новой технике и ее грядущих успехах из уст самого М.О.Доливо-Добровольского.

В Электротехническом обществе Доливо-Добровольский входил в руководящие органы и комиссии. В 1892 г. он был вместе с Феррарисом, О. Миллером, Уппенборном и другими крупными электротехниками избран в техническую комиссию Общества [Л. 203], членом которой он состоял с 1892 по 1901 и с 1905 по 1915 г. В 1901–1902 гг. Доливо-Добровольский был распорядителем (Ordner) Общества [Л. 204].

С 1889 по 1917 г. с перерывами в 1903–1909 и 1914–1918 гг. Электротехническое общество было свидетелем замечательной деятельности Доливо-Добровольского. Здесь он систематически докладывал о своих основных работах (в скобках заметим, что Доливо-Добровольский, человек практики, очень не любил писать, да и времени для этого у него было слишком мало; этим объясняется то, что у него нет ни одной монографии и очень мало статей; только в силу необходимости он составлял доклады для Электротехнического общества и тексты своих многочисленных патентов).

¹ Впервые М.О.Доливо-Добровольский выступил в Электротехническом обществе 22 апреля 1890 г. с замечаниями по докладу доктора Фёппла [Л. 202].

Современники Доливо-Добровольского отмечали, что его доклады, сделанные на безупречном немецком языке с некоторым русским акцентом, привлекали слушателей своей доступностью, ясностью мысли. Его речь была насыщена примерами из повседневной жизни, наполнена мягким юмором, и — самое замечательное — ему всегда удавалось сложнейшие процессы и явления описать доступным образом, наиболее простым путем [Л. 65].

Вообще Михаил Осипович обладал удивительной способностью проникать в глубину сложнейших физических явлений, почти не прибегая к помощи математических средств. По-видимому, он умело воспринял метод гениального Фарадея. Математика — это, понятно, великое средство анализа, и физика широко ею пользуется. Но далеко не легкое дело, так ясно, не заменяя физическую мысль математической символикой, донести до читателя или слушателя глубочайший смысл сложнейших явлений. Эта способность М.О.Доливо-Добровольского была как нельзя более кстати в тот период, когда новейшие открытия и изобретения в области техники переменного тока нужно было освоить широкому кругу инженеров и техников.

По отчетам о заседаниях Общества можно видеть, как постепенно Доливо-Добровольский завоевывал себе авторитет. Если вначале некоторые электрики относились скептически к его новаторству, не верили в будущность трехфазного тока, то к концу 90-х годов он уже стал признанным главой европейских электромехаников. Вскоре после того, как распространились сведения о результатах передачи энергии Лауфен — Франкфурт, сообщения о работах Доливо-Добровольского стали появляться в журналах на русском, немецком, французском, английском и других языках, его идеи проникали в лаборатории Дармштадта и Карлсруэ, Скенектеди и Барселоны, Турина и Стокгольма.

Особенно большую роль в деле распространения сведений о трехфазном токе сыграло выступление Доливо-Добровольского 9 сентября 1891 г. на Международном конгрессе электротехников во Франкфурте-на-Майне. Делегаты конгресса разнесли славу Доливо-Добровольского по всему свету.

В 1893 г. был учрежден Союз германских электротехников (VDE), в годовых собраниях которого принимал участие и Доливо-Добровольский. В 1900 г. этот Союз избрал его в первый состав Комиссии по электрическим машинам и трансформаторам, которая занималась вопросами нормализации. Эта комиссия провела большую работу по установлению нормалей для машин и трансформаторов, по усовершенствованию их конструкций.

Кроме этого, Доливо-Добровольский являлся членом технического комитета Союза, а также избирался в состав комиссии по технике безопасности в устройствах высокого напряжения, по изучению гистерезисных явлений, по исследованию токов в земле у электрических железных дорог и т. д. Особенно много внимания он уделял вопросам техники безопасности. Вспомним, что М.О.Доливо-Добровольский разработал совершенную схему защиты Лауфен — Франкфуртской электропередачи, исходя прежде всего из условий безопасности. В 1898 г. он специально выезжал на фабрику Розитцера, где произошел несчастный случай, для того чтобы внимательно изучить причины, вызвавшие смерть рабочего от удара электрическим током. Результаты его исследования были изложены им в обстоятельном отчете [Л. 27], изучение которого показывает, что Доливо-Добровольского можно считать одним из первых ученых, который занялся глубоким исследованием вопросов безопасности в электрических установках.

Но главной работой, поглощавшей почти все его время, была для Доливо-Добровольского работа на заводах фирмы. Правление фирмы, руководствовавшееся коммерческими интересами, безжалостно эксплуатировало умственные и физические способности талантливому инженеру. Используя монопольное право реализации патентов М.О.Доливо-Добровольского, которые по существовавшему правилу юридически являлись собственностью фирмы, АЭГ укрепляла свое положение среди других электротехнических компаний.

Чрезвычайно интенсивный труд выдающегося новатора, работа по ночам в период разработки основ систем трехфазного тока, когда руководители фирмы еще не верили в ее успех, серьезно под-

рывали и без того слабое здоровье Доливо-Добровольского. Характерно его личное признание: «Я посвятил все свободное от работы время, по большей части поздней ночью, дальнейшему развитию многофазных систем... Так как этим никто более у АЭГ не мог заниматься, я должен был все делать сам и всему придавать „удобоваримую“, осуществимую форму» [Л. 37].

Михаил Осипович никогда не терял своих связей с родиной, с Россией. Его братья и сестры были частыми гостями у него в Берлине. Он вел постоянную переписку с родственниками, друзьями, учеными и инженерами. Периодически он покидал Германию с тем, чтобы посетить родные края, увидеться со своими близкими и друзьями, встретиться с русскими электриками.

Эти поездки были необходимы и для того, чтобы продлить свой паспорт, так как по законам того времени лица, прожившие безвыездно много лет за границей, теряли право на продление своего заграничного паспорта, а следовательно, лишались русского подданства. Приезжая в Россию, Михаил Осипович обычно посещал Одессу, где жил у родных своей жены.

Многие русские люди в прошлом покидали свою родину. Одних привлекала беззаботная, полная мишурного блеска жизнь парижских салонов, лазурное море Ниццы или зеленые столы Монте-Карло. Другие – и таких было немало – искали за границей лучших условий для получения образования, лучшей почвы для приложения своих знаний и таланта. Третьи вольно или невольно не могли оставаться в России из-за своих политических убеждений. И если космополитизм первой группы лиц, состоящей из бездумных прожигателей жизни, достоин лишь осуждения, то едва ли о многих людях, принадлежавших к двум другим группам, можно сказать, что они не любили свою родину. Не вина, а беда многих и многих талантливых русских людей состояла в том, что Россия была для них недоброй мачехой.

Выдающимся событием в жизни русских электротехников был Первый Всероссийский электротехнический съезд, открывшийся в Петербурге 27 декабря 1899 г. (ст. стиля). Это событие было тем

более радостным, что на съезде присутствовал М.О.Доливо-Добровольский, который в это время уже находился в апогее своей славы.

Председатель съезда Николай Павлович Петров, крупнейший специалист по теории смазки, бывший в то время председателем Русского технического общества, отметил в своей вступительной речи большую роль М.О.Доливо-Добровольского в развитии электротехники. Он говорил, что после П.Н.Яблочкова руководящая роль в электротехнике перешла к Доливо-Добровольскому. «Тем отраднее для нас право, — продолжал Н.П.Петров, — позволяющее сказать, что и тут дело двигает вперед искусною рукою русский человек Михаил Осипович Доливо-Добровольский» [Л. 205].

По желанию всех присутствовавших на съезде и по настоятельной просьбе Н.П.Петрова Доливо-Добровольский выступил 28 декабря на общем заседании с большим докладом, который он назвал так: «Современное развитие техники трехфазного тока». В докладе он познакомил русских электротехников с краткой историей трехфазного тока, описал все основные элементы передачи энергии этим родом тока и обрисовал то состояние, которого достигла техника трехфазного тока к 1900 г. Закончил он свой доклад следующими словами: «Трехфазный ток стал современным культурным фактором; благотворное влияние, которое оказывает электротехника на жизнь западных народов, не замедлит обнаружиться и у нас на Руси.

Целью моего доклада было показать, как тесно связан последний прогресс электротехники с развитием системы трехфазного тока. Из приведенных примеров легко видеть, к чему пригодна эта система и с каким вооружением электротехника переступает через порог нового столетия» [Л. 29].

Как раз в тот период, когда работал Всероссийский съезд, велась деятельная подготовка к открытию Петербургского политехнического института, в котором намечалось создание электромеханического отделения. Уже во время съезда Н.П.Петров, ревностный сторонник политехнического образования, пришел к выводу, что лучшим руководителем электромеханического отделения (факультета)

тета) мог бы стать М.О.Доливо-Добровольский. Такую же мысль еще в 1897 г. высказывал в беседах с Михаилом Осиповичем будущий директор Петербургского политехнического института А.Г.Гагарин.

Н.П.Петров убедил тогдашнего министра финансов Витте, от которого зависело решение вопроса, в необходимости и целесообразности приглашения в Политехнический институт Доливо-Добровольского. Н.П.Петров писал 15 февраля 1900 г. министру: «... так как в настоящее время электротехника самым существенным образом влияет на все отрасли техники, то приготовление молодых людей искусственным в практической деятельности, выдающимся по своим знаниям и по своему искусству человеком, создавая целую массу отлично подготовленных и столь же хорошо, сколько и верно направленных работников-инженеров, поведет за собой высоко-полезное, выдающееся и наверное оригинальное поступательное движение всей нашей технической и заводской деятельности. При всем важном значении, какое имеет теперь оригинальность в инженерном деле, можно предвидеть громадную пользу от приглашения Доливо-Добровольского, нельзя даже перечислить все вероятные, хотя бы самые важные, благие последствия» [Л. 206].

На соответствующий запрос Доливо-Добровольский сейчас же ответил согласием принять на себя обязанности декана Электромеханического отделения института.

20 июля канцелярия министра финансов официально уведомила Доливо-Добровольского, что министр «ввиду выраженного Вами (т. е. Доливо-Добровольским. — О. В.) согласия принести Ваши глубокие научные познания и Ваш обширный практический опыт на пользу служения русской технической науке, изволил остановить на Вас свой выбор, как на декане электромеханического отделения С. Петербургского Политехнического института» [Л. 207].

Директор института А.Г.Гагарин завел интенсивную переписку с М.О.Доливо-Добровольским [Л. 208], давал ему ряд поручений по подготовке к началу занятий, а также просил скорее переезжать на постоянное жительство в Петербург. Задержка Доливо-Добровольского, который в это время был занят по делам Всемирной выставки

и Международного конгресса электриков в Париже, где он в числе других деятелей науки представлял Россию, сказывалась на ходе строительства института. Архитектор не мог без него решить, в частности, вопрос об объеме помещений для электромеханического факультета. А.Г.Гагарин писал: «... раз на продолжительное время приехать Вы не можете, то приезжайте теперь хотя не надолго: директивы дать, заместителя временного приискать, который бы действовал согласно с Вашими взглядами и т. п... Таким образом присутствие Ваше крайне необходимо: работать и организовать работу свою и других Вы умеете: приезжайте и действуйте» [Л. 209].

Письма, которые писали М.О.Доливо-Добровольскому А.Г.Гагарин и другие лица и которые хранятся в Ленинградских государственных архивах, проникнуты искренней теплотой; в них выражено дружеское отношение к выдающемуся соотечественнику и восхищение его работами в области электротехники.

Решение Доливо-Добровольского вернуться в Россию стало широко известно. В декабре 1900 г. сообщение об этом было опубликовано в крупнейшем немецком электротехническом журнале «Elektrotechnische Zeitschrift» [Л. 210]. Петербургская газета «Новость» в № 255 от 16 сентября 1901 г. писала: «Мы слышали, что проживающий постоянно за границей известный русский ученый Доливо-Добровольский, приобревший всемирную известность своими открытиями в области электротехники, получил от нашего министерства финансов предложение занять место декана во вновь открывающемся в Петербурге политехникуме». Аналогичные сообщения появились и в других газетах [Л. 211].

Однако многочисленные дела, скопившиеся на заводах фирмы АЭГ, и незавершенные работы не позволили М.О.Доливо-Добровольскому переехать уже в 1900 г. на постоянное жительство в Петербург. Кроме того, нужно учитывать ту обстановку и взаимоотношения Доливо-Добровольского с руководством фирмы, которые сложились в этот период. Едва ли можно допустить мысль, что правление фирмы с охотой отпускало своего шеф-электрика, сделавшего очень много для того, чтобы АЭГ в техническом отношении стала ведущей элек-

тротехнической фирмой. Как раз напротив, руководители фирмы делали все, чтобы удержать у себя выдающегося инженера. От него требовали выполнения старых договорных обязательств, завершения всех начатых работ и пр. и пр. Насколько далеко было от истины официальное сообщение об уходе Доливо-Добровольского из АЭГ, в котором говорилось, что это решение «принято с дружественного согласия АЭГ» [Л. 210], видно из частных писем Михаила Осиповича. Так, в письмах к А.Г.Гагарину, указывая на свою «крайнюю зависимость от АЭГ», он писал: «Во всяком случае я еще 3 года некоторым образом в рабстве» [Л. 212].

В марте 1901 г. Доливо-Добровольский приезжал в Петербург с целью проверить ход строительства института и дать соответствующие указания. Тогда же ему удалось договориться о том, чтобы временно исполнявший обязанности декана электромеханического факультета проф. М.А.Шателен не менее двух раз в год командировался за границу. Встречаясь с ним, Доливо-Добровольский мог более детально следить за работой института, участвовать в составлении учебного плана и помогать М.А.Шателену советом и делом. В 1901 г. он передал институту свою богатую библиотеку периодической литературы и организовал снабжение института лабораторным оборудованием. Оставалось только выждать требуемые фирмой три года, и в 1903 г. Доливо-Добровольский мог бы вернуться на родину. Близко было исполнение горячего желания покинуть чужую страну, где он «жил всегда более или менее на временном положении», откуда он постоянно стремился «в конце концов вернуться на родину» [Л. 213].

Но этому, к сожалению, не суждено было сбыться. В 1903 г. резко обострилась сердечная болезнь, которой Михаил Осипович страдал с юных лет. По категорическому требованию врачей он поехал для лечения в Швейцарию. Осенью стало ясно, что болезнь затягивается, и Михаил Осипович вынужден был отказаться от переезда в Петербург, о чем он сообщил в письме (рис. 8-2) на имя товарища министра финансов. 15 октября 1903 г. он направил из Лозанны полное сожалений и душевных переживаний письмо А.Г.Гагарину.

Вот почти полный текст этого письма: «... до сих пор медлил окончательным решением, надеясь, что состояние моего здоровья подаст надежду на „срочное“ выздоровление. Я уже неоднократно писал г-ну профессору М.А.Шателену, что до сих пор не чувствую себя в состоянии принять на себя ту работу, на которую я готовился с такою радостью. К сожалению, несмотря на большую пользу, которую приносит мне здешний воздух и отдых, — я еще не способен к про-

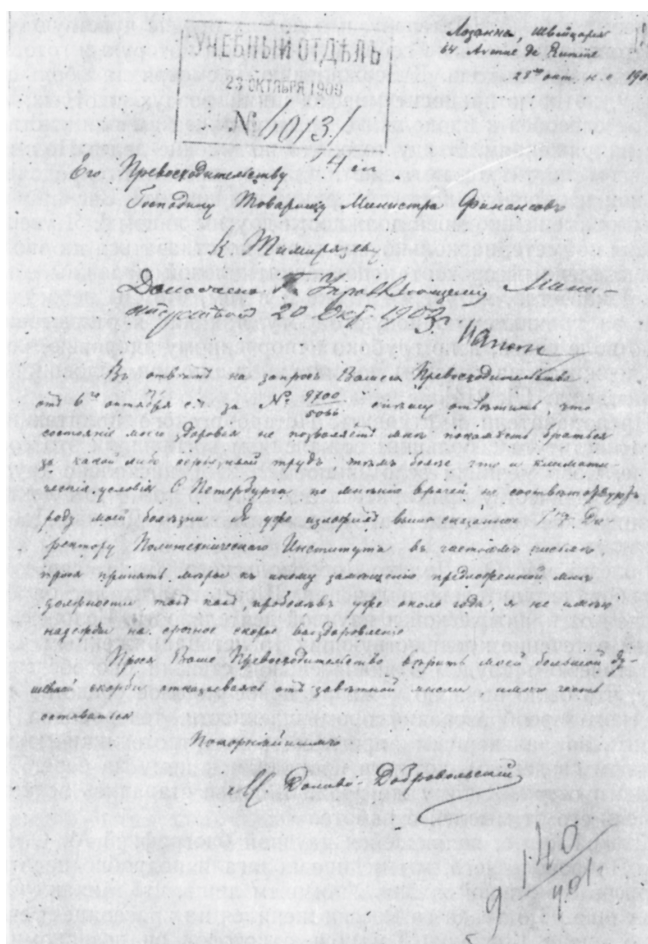


Рис. 8—2. Письмо М.О.Доливо-Добровольского.

должительным физическим или умственным напряжениям. Ввиду того, что положение дел в Политехническом институте не может, однако, позволить продолжительной неопределенности, я принужден просить Вас принять меры к замещению моей должности другим лицом¹. Я уверен, что Вы поймете, насколько мне горестно отказаться на вполне неопределенный срок от исполнения холеной надежды, быть может навсегда, но уверен также и в том, что Вы не осудите меня за причиняемую новую заботу, так как я отказываюсь не по воле своей, а по глубоко испорченному здоровью, которое держится на сносном положении лишь при условии полного отдыха» [Л. 214].

Преподаватели и студенты Петербургского политехнического института с большим сожалением восприняли это сообщение. Современники вспоминают [Л. 215], насколько трудно было студенчеству примириться с мыслью о том, что Электромеханическое отделение не будет возглавлено Доливо-Добровольским.

Болезнь М.О.Доливо-Добровольского была серьезной и требовала длительного лечения. Шесть долгих лет он был оторван от практической и научной деятельности. Человек, который в течение предшествующих 15 лет напряженным и систематическим трудом в значительной степени способствовал тому, что было вызвано к жизни новое мощное средство технического преобразования промышленности, теперь едва мог следить за дальнейшим прогрессом электротехники по тем скудным сведениям, которые проникали к нему на берег Женевского озера. К тому же врачи и семья старались всячески отвлечь его от мыслей о работе.

В этой книге, являющейся научной биографией М.О.Доливо-Добровольского, мы не предполагали подробно касаться вопросов его личной жизни. Упомянем лишь, что Михаил Осипович еще до отъезда из России женился на красавице-гречанке по имени Корне-

¹ По совету М.О.Доливо-Добровольского на должность декана Электромеханического факультета был приглашен профессор М.А.Шателен, который продолжал поддерживать связь с М.О.Доливо-Добровольским и пользоваться его советами и конкретной помощью [Л. 64].

лия Т у м б а, с которой он познакомился в Одессе. От этого первого брака он имел двоих сыновей: Дмитрия (родился в 1891 г.) и Сергея (родился в 1895 г.). Оба сына впоследствии остались на постоянное жительство в Лозанне (Швейцария). В 1907 г. он женился вторично. Оба сына второй жены Доливо-Добровольского (ее имя было Хедвига ван Таак-Тракранен, урожденная Паллачек) нашли в нем чуткого, внимательного и любящего отца. Почти полвека спустя проф., доктор-инженер Н.И.ван Таак-Тракранен в письме вспоминал своего отчима следующими теплыми словами: «В личной жизни он был преданным отцом не только по отношению к своим родным детям, но и по отношению к пасынкам. Он с необыкновенным педагогическим умением влиял на развитие характера и мышления каждого из своих детей. Это влияние было очень большим, и он воспитал нас, юношей, в духе его мировоззрения, которое презирало эгоизм и алчность, но возводило в жизненный принцип гуманность и социальные обязанности. Одновременно он дал нам примеры скромности, постоянной готовности посвящать себя людям и помогать им; он проявлял великодушную терпимость в области религии, мировоззрения и общечеловеческих чувств, но зато в вопросах этики был неумолим».

Лишь только позволило состояние здоровья, М.О.Доливо-Добровольский вернулся в Берлин. Это было в 1909 г. Вынужденный длительное время оставаться без работы, а следовательно, и без соответствующего заработка, Михаил Осипович, естественно, рассчитывал на то, что фирма АЭГ охотно предоставит место для бывшего своего шеф-электрика и обеспечит его в материальном отношении. Правда, он мог рассчитывать на аналогичные условия, по-видимому, и на любом другом заводе и, наверное, не только в Германии. Правление фирмы, конечно, не могло упустить этого случая. М.О.Доливо-Добровольский стал техническим директором завода электрических аппаратов АЭГ и консультантом фирмы по вопросам электрических машин.

Здесь можно лишь выразить сожаление, что знаменитый изобретатель вновь остановился в Берлине вместо того, чтобы вернуться в Россию. Сейчас, конечно, трудно установить истинный характер

побуждений, которыми он руководствовался: это могла быть и сила привычки, возвращавшая его на старое место работы, немалое влияние оказали, по-видимому, и новые семейные связи — для второй жены Михаила Осиповича Россия была чужой страной, не вызывавшей у нее никакого интереса, это, наконец, могли быть какие-то иные, неизвестные нам причины.

Электроаппаратостроительный завод АЭГ, сданный в эксплуатацию в 1906/1907 гг., представлял собой крупнейшее предприятие, насчитывавшее 7 500 рабочих и располагавшее производственными площадями, составлявшими 60 000 м². Под руководством Доливо-Добровольского этот завод превратился в передовое в техническом отношении, высокомеханизированное предприятие, завоевавшее широкую известность во всем мире благодаря высокому качеству продукции. В стенах этого завода Доливо-Добровольский продолжал свою научно-исследовательскую и изобретательскую деятельность, и именно здесь он разработал рассмотренные в одной из предыдущих глав дугогасительные устройства выключателей высокого напряжения.

Но недолго пришлось ему работать на заводе. В 1914 г. разразилась первая мировая война.

Русский инженер со взрослыми сыновьями не мог оставаться в стране, воюющей с Россией. В спешном порядке он вынужден был переехать в нейтральную Швейцарию и поселиться в знакомой уже Лозанне.

В Швейцарии М.О.Доливо-Добровольский оставался практически до конца русско-германской войны.

Только в июне 1916 г. по приглашению Союза германских электротехников Доливо-Добровольский приезжал во Франкфурт-на-Майне, чтобы принять участие в годовом собрании Союза, посвященном 25-летию Франкфуртской выставки. На утреннем заседании 3 июня с докладом о Франкфуртской выставке выступил профессор Эпштейн. После его доклада все собрание единодушно выразило желание увидеть на трибуне съезда творца Лауфен—Франкфуртской передачи энергии.

Доливо-Добровольский, выступивший сразу же после обеденного перерыва, с присущей ему скромностью сделал обзор состояния электротехники до 1891 г., только несколькими скупыми словами обрисовал тот качественный скачок, который был совершен благодаря его трудам в 1891 г. и показал, насколько благотворной оказалась идея применения трехфазного тока в дальнейшем развитии электротехники [Л. 36].

В начале 1918 г. Доливо-Добровольский снова переехал из Швейцарии в Берлин, где стал инженером-консультантом АЭГ по вопросам электромашиностроения и электроаппаратостроения, а также заместителем члена правления компании. За последние годы он вынашивал идею передачи энергии постоянным током на сверхдальние расстояния при сверхвысоком напряжении. Как мы видели в предыдущей главе, доклад с изложением этой идеи он сделал 26 ноября 1918 г.

Несмотря на то, что многие видные электротехники высказывали сомнения относительно ценности и практического значения нового труда, М.О. Доливо-Добровольский не хотел, да и не мог отказаться от дальнейших исследований. Он был закаленным бойцом передового фронта технического прогресса. И если 30 лет назад выступления авторитетнейших ученых не могли поколебать его уверенности в правоте своего дела, когда он боролся за внедрение техники переменного тока, то не к лицу ему было отступать перед трудностями и теперь.

В середине 1919 г. Михаил Осипович переехал в Дармштадт, город своей alma mater. Он предполагал здесь наконец-то осуществить свою мечту: читать лекции для студентов высшего технического училища, того самого училища, которое он окончил за 35 лет до этого. Там же, в Дармштадте, он немедленно принялся за детальное изучение проблемы передачи энергии постоянным током. Но спокойная научно-исследовательская работа, для которой ему всегда как-то не хватало времени, не удалась ему и здесь. Тяжелая болезнь, преследовавшая его с юных лет, обострилась в результате непосильного труда и нервного возбуждения, обусловленного веч-

ным чувством личной неустроенности, оторванности от родины, где происходили великие события.

Осенью положение больного стало настолько серьезным, что родные перевезли Михаила Осиповича в Гейдельберг, где поместили его в академическую больницу. Здесь, в городе, расположенном между Лауфеном и Франкфуртом-на-Майне, 15 ноября 1919 г. оборвалась жизнь крупнейшего электротехника, творившего на стыке прошлого и текущего веков. Весь электротехнический мир склонил голову перед прахом одного из величайших своих представителей.



Изучение различных трудов М.О.Доливо-Добровольского позволяет составить некоторое представление о характере его научных воззрений, а также выяснить характерные черты его инженерно-организационной деятельности.

М. О. Доливо-Добровольский в своих научных изысканиях прочно стоял на позициях основных законов природы: закона сохранения материи и закона сохранения и превращения энергии [Л. 28]. Если замечались какие-либо отклонения от этих основных законов, то Доливо-Добровольский склонен был искать ошибку в собственных исследованиях, считал нужным убедиться «прежде чем подкапывать такое колоссальное здание (закон сохранения энергии. — О.В.)... сперва в том, что не происходят ли те небольшие отклонения, которые мы замечаем, от неполного знакомства нашего со всеми сторонами того или другого явления» [Л. 2].

В последней цитате между прочим можно уже уловить и то, что Доливо-Добровольский с самого начала своей деятельности (работа относится к 1885 г.) был далек от любого проявления агностицизма. Он всегда считал, что если в науке еще что-то неясно или противоречит некоторым привычным правилам, то это означает, что наука еще не достигла такого уровня, чтобы разрешить возникшие сомнения; это значит, что нужно трудиться, искать решение, и оно всегда будет найдено.

Здесь следует отметить, что по времени творчество Доливо-Добровольского частично совпадает с тем периодом, который в философии получил название периода «кризиса физики», когда многие ученые-физики потеряли почву под ногами, когда стихийно сложившиеся материалистические взгляды на теорию познания стали уступать место взглядам идеалистическим и агностическим. На самом деле, как известно, никакого кризиса в физике-науке не было. Это был кризис роста в мировоззрении. Физики должны были убедиться, что процесс познания практически безграничен, что знание идет глубже, и то, что раньше считалось абсолютным, превращается на более высокой ступени познания в относительное. Насколько можно судить по работам Доливо-Добровольского, ему удалось избежать этого «кризиса».

Наравне с агностицизмом творчеству Доливо-Добровольского были чужды и любые проявления мистицизма. Уже в своих ранних работах он резко бичует тех электриков, которые «заразились мистицизмом». Ставя перед собой задачу разъяснить основные недоразумения, распространенные между электрохимиками, Доливо-Добровольский пишет: «Надеюсь, что отсутствие мистического настроения и употребление элементарных физико-механических законов облегчит мне до некоторой степени достижение этой задачи» [Л. 2]. Позднее он не менее резко критиковал электротехников, у которых проявлялись суеверие и мистицизм, как только они заговаривали о переменном токе [Л. 7].

Творчество Доливо-Добровольского существенно отличалось от творчества того рода изобретателей, наиболее ярким представителем которого был Эдисон. Если девизом последнего было: изобретать, изобретать и изобретать, независимо от того, в какой области и для какой цели будет служить то или иное изобретение: будь то фонограф или биржевой телеграф, литые дома или баллотировочный счетчик, то Доливо-Добровольский всегда стремился свести свои работы в стройную систему, научно и экспериментально ее обосновать и наметить пути ее дальнейшего развития. Он совершенно правильно понимал, что «задача науки состоит только частично в том,

чтобы открывать или регистрировать новые тела и новые действия или явления, гораздо большая задача состоит в том, чтобы приложить к этому разум, сортировать открытия и познания, отдельные факты привести к общим законам, установить зависимости и переходы отдельных форм, другими словами, придать пестрому материалу определенную структуру (стройность)» [Л. 28]. Здесь же Доливо-Добровольский замечает, что «тот, кому структура науки вошла в плоть и кровь, может в данной области сделать больше, чем тот, чья память обременена тысячами отдельных фактов и деталей».

В этих высказываниях замечательно проявляется стремление Доливо-Добровольского усмотреть диалектическую связь между отдельными явлениями объективного мира, уловить, как он выражается, «зависимости и переходы отдельных форм».

Доливо-Добровольский в самом начале процесса специализации в электротехнике сумел заметить тот вред, который влечет за собой отрыв узкого специалиста от основных требований всей данной отрасли техники. Он понимал, что «хотя специализация и необходима для прогресса деталей, но от этого, однако, страдает „большой“ прогресс, и там, где узкие специалисты объединяются для совместной работы и не упускают из виду общих задач техники, чаще всего можно наблюдать заметные скачки в этом „большом“ прогрессе» [Л. 35].

Чрезвычайно важное значение придавал Доливо-Добровольский связи науки с практикой. «Высокое развитие сегодняшней техники, — писал он, — в основном зиждется на ее единении со строгой наукой. Законы природы, которые исследуют физика и химия, используются техникой в том отношении, что она целесообразно приводит различные тела в такое положение или связь, из которого возникают действие или вещества в желаемом виде» [Л. 28]. Техника не только ставит задачи науке, но и помогает ей в проверке ее достижений на конкретном, живом материале. Для науки и техники чрезвычайно важно «различать процессы не только качественно, но и количественно ... Все области, — пишет далее Доливо-Добровольский, — в которых мы еще не научились оперировать с цифрами и мерами, останавливаются в их развитии и могут быть сравнены

скорее с пестрым калейдоскопом фактов или красивой детской книжкой с картинками, чем с разделом точной науки. Несмотря на их порой научный покров, такие области принадлежат целиком или в большей части тому, что называют трюкачеством» [Л. 28].

С уничтожающей критикой обрушивается Доливо-Добровольский на «господ от науки», которые берутся устанавливать технические нормы и правила, не выходя из своих «гелертерских» кабинетов, порою даже не видя тех технических агрегатов, о которых они пытаются рассуждать. С характерной для него страстностью защищал, например, Доливо-Добровольский точку зрения электротехников-практиков по вопросу узаконения электрических единиц [Л. 16]. Чрезвычайно удачным и замечательным было то, что Доливо-Добровольский, являясь талантливым ученым, в силу обстоятельств почти всю жизнь работал на заводах.

В своих письмах к А.Г.Гагарину Доливо-Добровольский развивает взгляды на необходимость тесной связи Политехнического института с промышленностью, на необходимость развития в институте научных работ и преподавания в соответствии с требованиями промышленности [Л. 212].

Доливо-Добровольский всегда считал, что истина вскрывается лучше всего в борьбе мнений, в живом обмене мыслями, когда выясняется единая точка зрения, которая может соответствовать истине [Л. 3]. Именно поэтому он горячо приветствовал созывы всевозможных съездов и конференций ученых, в которых сам активно участвовал.

Большое значение он придавал распространению и популяризации своих научных взглядов и практических достижений, равно как и вообще новейших достижений электротехники. Все его публичные выступления являли собой образец научной страстности и принципиальности в защите своей точки зрения. Он, как никто, умел увидеть то новое в науке и технике, чему принадлежит будущее: например, одним из первых он по достоинству оценил предложенный Гопкинсонами метод расчета машин, к которому многие электротехники отнеслись сначала скептически. Все его работы показывают, что он умел

находить главное в развитии той или иной отрасли электротехники и последовательно устранять все возникающие на ее пути трудности. Он не боялся положить начало новому направлению в избранной им области, найти смелое, оригинальное решение проблемы. Так, например, разработав конструкции ферродинамических приборов, он сделал крупный вклад в область электроизмерительной техники, в которой слишком долго топтались на месте и оставляли промышленность без технических измерительных приборов. В этой области, как говорил Доливо-Добровольский, никак «не хотели начать» [Л. 35].

У Доливо-Добровольского совершенно отсутствовало какое бы то ни было преклонение перед авторитетами. Он не поверил известному ошибочному выводу Феррариса, впоследствии выдержал ожесточенную борьбу против так называемых сторонников постоянного тока, в числе которых были крупные специалисты; он систематически боролся за внедрение трехфазного тока и в конце жизни пошел наперекор всеобщему мнению в отношении передачи энергии постоянным током. Если его оппоненты в своих выступлениях руководствовались, как он говорил, не научно-технической убежденностью, а фанатизмом [Л. 36], то таким «критикам», «советчикам» и «прочим хранителям традиций» [Л. 35] он давал жестокий отпор, часто уничтожая их едкой иронией.

Но, с другой стороны, Доливо-Добровольский умел прислушиваться к критике своих взглядов и всегда делал для себя правильные выводы. Так, он не сумел вначале полностью оценить преимущества одиночного промышленного электропривода, ограничивая область его применения только отдельными крупными установками. Для станков небольшой мощности он считал вначале более целесообразным групповой привод (см., например, [Л. 216]), но впоследствии резко изменил свое ошибочное мнение и стал одним из наиболее ревностных сторонников одиночного электропривода [Л. 29. а также Л. 217].

Доливо-Добровольский был не только выдающимся ученым и изобретателем, но и талантливым инженером-организатором. Для характеристики этой стороны его деятельности хороший материал

дает его доклад о массовом производстве на электроаппаратостроительном заводе, сделанный 17 января 1912 г. для сотрудников и клиентов АЭГ [Л. 34].

Доливо-Добровольский сумел правильно понять основные тенденции развивающегося промышленного производства и при все возраставшем уровне технической оснащенности промышленных предприятий видел единственный путь движения вперед в развитии массового производства. Электроаппаратостроительный завод под его руководством стал одним из первых крупных предприятий электротехнической промышленности с широко развитым массовым производством изделий. Как обычно бывает во всяком новом деле, нашлись консерваторы и дельцы — агенты конкурирующих фирм, которые начали спекулировать на термине «массовое производство», и привлекать к себе невежественных покупателей тем, что массовому производству они противопоставляли свое, якобы лучшее, индивидуальное производство. Термин «массовое производство» отождествлялся с понятием производства низкокачественных товаров широкого потребления.

Доливо-Добровольский показал, что массовое производство в значительно большей степени удовлетворяет требованиям качества продукции, ибо здесь в максимальной степени устранен произвол рабочего, а требование взаимозаменяемости деталей обеспечивает точность их обработки. Он показал также, что сфера индивидуального производства должна быть ограничена только изготовлением предметов искусства со свойственными им индивидуальными признаками, а также теми отраслями производства, где существенные различия в сырье, делают возможным качественное изготовление фабрикатов только благодаря умственному участию людей. На передовом заводе индивидуальное производство должно заканчиваться изготовлением штампов и первых образцовых экземпляров продукции, а умственная деятельность рабочих должна направляться не на максимально точное копирование одних и тех же деталей (что машина все равно сделает лучше), а в какое-либо более благодарное русло. «Что сказали бы, — говорил Доливо-Добровольский, — если бы

каждая швейная иглолка, каждое школьное перо, которыми мы пользуемся, имели бы „индивидуальные“ признаки, следовательно, не были бы вполне заменимы?» [Л. 34].

При обширной номенклатуре выпускаемых изделий (на электроаппаратостроительном заводе насчитывалось свыше 10 000 видов продукции) Доливо-Добровольский твердо проводил линию нормализации деталей, что значительно сокращало потребное оборудование, а следовательно, и стоимость изделий. Наилучшим образом на заводе был организован и технический контроль, который практически совершенно исключал выпуск недоброкачественной продукции.

Доливо-Добровольский придавал большое значение техническому образованию рабочих и служащих. В 1909–1912 гг. он сделал ряд докладов на заводах АЭГ, в которых излагал основы электротехники. Он с удовольствием руководил экскурсиями различных групп специалистов по заводам фирмы.

С особым вниманием и чуткостью Доливо-Добровольский встречал инженеров и техников из России, желавших познакомиться с производством; он не жалел ни времени, ни сил, стремясь показать все возможное и всячески помочь своим соотечественникам. Так, посетивший в 1901 г. Берлин инженер Н.И.Сушкин (впоследствии профессор Московского высшего технического училища) писал: «Считаю своим долгом выразить глубокую благодарность главному электротехнику заводов АЭГ М.О.Доливо-Добровольскому, доставившему мне доступ во все отделы и способствовавшему таким образом моему знакомству с общим производством» [Л. 217]. Возвратившиеся из экскурсии в Берлин русские студенты-электротехники отмечали: «Особенно любезный прием был оказан студентам фирмой «Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft» благодаря содействию русского ученого электротехника Доливо-Добровольского, состоящего в этом обществе» [Л. 218]. Можно также напомнить, что А.С.Попов, изучавший в 1900 г. состояние производства радиотелеграфной аппаратуры в Германии, писал: «Благодаря рекомендациям проф. Слаби и главного электротехника фирмы АЭГ г.Доливо-Добровольского, нашего соотечественника, я имел случай ознакомиться во всех де-

талях как с приборами телеграфирования, так и с подробностями устройства самой мастерской» [Л. 219].

М. О. Доливо-Добровольский при всей своей занятости делами фирмы выкраивал время для научной работы и умело использовал каждую минуту свободного времени. Он успевал внимательно следить за всей электротехнической литературой, равно как старался не пропускать новинки художественной и социально-политической литературы.

Доливо-Добровольский не упускал случая обсудить в дружеской беседе характер тех или иных общественно-политических течений. В своих беседах и спорах он часто подчеркивал, что технический прогресс тесно связан с прогрессом общественным. Например, Б.И.Угримов вспоминал, что М.О.Доливо-Добровольский еще в 90-х годах прошлого столетия «утверждал, что применение электрической энергии в большом масштабе — теперь называемое электрификацией — перевернет социальный быт народов» [Л. 59].

Михаил Осипович среди массы дел умел находить время и для занятий спортом. Любимым его видом спорта были велосипедные прогулки и соревнования. В те годы, когда велосипед был новинкой и бизнесмены от спорта еще не успели завладеть велодромами, чтобы сделать их коммерческими предприятиями, известного ученого и инженера, пионера техники трехфазного тока можно было часто видеть среди участников велосипедных гонок [Л. 220].

Все лично знавшие М.О.Доливо-Добровольского единодушно отмечают, что он был не только выдающимся техником и ученым, но и человеком исключительных душевных качеств. В нем удачно сочетались глубокий ум, общительный характер и сердечная чуткость к людям. Он умел, как никто, в легко доступной форме изложить самые сложные технические вопросы и легко поддерживать беседу независимо от того, затрагивались ли в ней темы производства, искусства или социологии. Имя Михаила Осиповича всегда называлось его товарищами по профессии с признательностью и всеми, кто его знал, — с уважением.

«УВАЖЕНИЕ К ИМЕНАМ, ОСВЯЩЕННЫМ СЛАВОЮ...
ЕСТЬ ...ПЕРВЫЙ ПРИЗНАК УМА ПРОСВЕЩЕННОГО».

А.С.Пушкин

ГЛАВА IX

МЕСТО М.О.ДОЛИВО- ДОБРОВОЛЬСКОГО В ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Трехфазный ток в России и за рубежом. Признание заслуг М.О.Доливо-Добровольского за рубежом, в дореволюционной России и в СССР.

На предшествующих страницах этой книги перед читателем прошла наполненная значительными событиями жизнь Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, одного из самых выдающихся представителей славной плеяды электротехников, творивших в конце XIX и в начале XX веков. Попробуем теперь выяснить вопрос о том, какое место в истории электротехники занимает М.О.Доливо-Добровольский.

Известно, что об исторических заслугах судят по тому, что нового внесли в науку или технику те или иные исторические деятели в сравнении со своими предшественниками.

По нашему убеждению, лучше всего это можно сделать, вспомнив о том, чем стала электротехника после изобретений М.О.Доливо-Добровольского. Разумеется, было бы непростительной ошибкой предположить, что все, чем отличается электротехника первых десятилетий текущего столетия от электротехники 80-х годов прошлого

века, сделано исключительно благодаря трудам Доливо-Добровольского. Нет, это был труд большой армии электриков всех стран мира. Но едва ли нужно доказывать после всего написанного выше, что в первых рядах этой армии и на самых ответственных участках фронта технического прогресса в этот период находился именно М.О.Доливо-Добровольский. Руководящая роль его в развитии электротехники рассматриваемого периода несомненна.

После 1891 г., когда была осуществлена передача электроэнергии из Лауфена во Франкфурт, начался новый этап в развитии электротехники, а может быть, и техники вообще. Действительно, в конце прошлого века важнейшей производственной задачей являлась задача экономичного энергоснабжения промышленных предприятий, которые приобретали все более крупные масштабы. Наиболее гибкой, универсальной и легко транспортируемой формой энергии является электрическая энергия, и поэтому проблема энергоснабжения в конечном итоге становилась проблемой экономичного электроснабжения. Именно этим объясняется тот широко известный факт, что энергетической базой производства в этот период становится электроэнергетика, а наиболее бурно развивавшейся и качественно ведущей отраслью промышленности становится электропромышленность.

Всемирно-исторической заслугой деятелей электротехники, и среди них в первую очередь М.О.Доливо-Добровольского, является то, что в результате их трудов начался процесс перевода народного хозяйства на техническую базу современного крупного производства, связанный с широким внедрением электричества в промышленность, транспорт, сельское хозяйство и другие отрасли, т. е. тот процесс, который получил название электрификации. Известно, что электрификация предполагает изменения не только в области энергетики, но и общую реконструкцию народного хозяйства с широким применением механизации и автоматизации производственных процессов, с внедрением на всех участках производства новейшей техники; электрификация производит такие коренные сдвиги в системе производительных сил, которые по своим последствиям равнозначны новому промышленному перевороту.

Процесс электроснабжения, составляющий техническую сущность электрификации, состоит из трех основных частей: производства, распределения и использования электроэнергии. На развитии каждого из этих трех элементов, равно как и на развитии всего комплекса в целом, яркий отпечаток оставила деятельность М.О.Доливо-Добровольского.

Вслед за Лауфенской гидроэлектростанцией, вступившей в промышленную эксплуатацию в январе 1892 г. [Л. 221], начали строиться новые электростанции трехфазного тока, сначала в Германии, а затем и в других странах. Удельный вес производства электроэнергии на станциях постоянного и однофазного токов неуклонно уменьшался и примерно с 1898 г. безусловное первенство в борьбе за выбор рода тока окончательно укрепилось за трехфазным током.

Русские электротехники пристально следили за работами в области переменного тока и с чувством особой гордости отмечали каждый успех М.О.Доливо-Добровольского. Известно, что русские электрики прошлого века вписали немало славных страниц в историю электротехники и не только не отставали, но часто шли впереди своих зарубежных коллег. Не медлили они и с применением трехфазного тока.

Еще 22 февраля 1891 г., т. е. до публичных выступлений Доливо-Добровольского, председатель VI отдела Русского технического общества В. Я. Флоренсов сообщил о предполагаемой передаче энергии из Лауфена во Франкфурт. «Вся эта установка, — говорил Флоренсов, — делается по идее и под руководством нашего соотечественника М.О.Доливо-Добровольского...» [Л. 222]. Свое сообщение Флоренсов закончил изложением кратких сведений о Доливо-Добровольском.

Журнал «Электричество» регулярно знакомил своих читателей с ходом работ по строительству знаменитой электропередачи, а также с результатами ее испытаний. В том же 1891 г. VI отдел вел деятельную подготовку к Четвертой Петербургской электротехнической выставке, которая открылась 11 января 1892 г. На этой выставке основное внимание было уделено вопросам передачи электроэнергии. Вся электрическая сеть питалась переменным током при

напряжении до 2000 в. Для ознакомления посетителей с новой системой тока известный русский профессор Иван Иванович Боргман демонстрировал модели трехфазных машин. На выставке работал генератор трехфазного тока, который питал асинхронный двигатель с обмоткой ротора в виде беличьей клетки. Обе машины имели мощность по 20 л. с.

В обзоре успехов электротехники в 1891 г. журнал «Электричество» давал очень высокую оценку трудам Доливо-Добровольского. В журнале, между прочим, отмечалось: «Особенно интересен двигатель нашего соотечественника Доливо-Добровольского ..., в нем вращающееся магнитное поле производится тремя токами, сдвинутыми на 120° по фазе друг относительно друга и требующими для передачи своей всего три проволоки; между тем как даже двигатель Тесла с двумя токами требовал проводки четырех проволок. Система Доливо-Добровольского тем более интересна, что она единственная из всех, которая пока выдержала самое строгое испытание, именно испытание практического выполнения ее в больших размерах...» [Л. 223].

Весьма примечательно то обстоятельство, что, несмотря на общую отсталость России в практических применениях электротехники сравнительно с другими странами, которая стала заметно проявляться в 90-х годах прошлого века, установки трехфазного тока появились здесь очень рано, даже раньше, чем в некоторых зарубежных странах.

Первым предприятием в России, электрифицированным на базе трехфазного тока, был Новороссийский элеватор [Л. 224].

Электростанции трехфазного тока были, как правило, уже станциями нового типа. Это не старые мелкие электростанции с локомотивом и ременным приводом, с небольшим радиусом электроснабжения. Это, можно сказать, — станции современного типа, с котельными и машинными отделениями, с крупными агрегатами, со сложными распределительными устройствами и с развитой электрической сетью. Многие из этих станций успешно работают до настоящего времени.

Развитие городских сетей делало экономически нецелесообразным существование в одном городе многих мелких станций и они за-

кывались одна за другой. Сети укрупнялись и объединялись, возникали первые крупные электрические системы, включавшие районные и городские электростанции. Этот процесс укрупнения электрических мощностей сопровождался ростом напряжений. В энергетическом хозяйстве повысился удельный вес электрической аппаратуры и особенно выключателей высокого напряжения. В первые десятилетия текущего столетия при активном участии М.О.Доливо-Добровольского были уже разработаны практически все основные типы современных выключателей.

Изобретение трехфазного асинхронного двигателя ознаменовало собой начало нового этапа в развитии электропривода. В достаточно короткий срок этот тип электродвигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. И это, конечно, не случайно. Трехфазный ток оказался весьма удобным для передачи энергии на большие расстояния, но даже независимо от этого, трехфазный ток получил всеобщее признание благодаря высоким качествам электродвигателей.

Одним из важнейших преимуществ асинхронного двигателя перед двигателями постоянного тока является отсутствие у него коллектора. Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, позволяет установить в каком-либо цехе сотни и тысячи двигателей, почти не требующих никакого ухода. Такие двигатели могут выполняться герметически закрытыми и, следовательно, их можно использовать в любых тяжелых условиях: в атмосфере повышенной влажности, в атмосфере бензиновых паров и т. д. Асинхронные двигатели без вреда выдерживают значительные кратковременные перегрузки, тогда как в двигателях постоянного тока любая перегрузка разрушительным образом сказывается на коллекторе.

Внедрение асинхронного двигателя сыграло революционизирующую роль в промышленном производстве. Паровая машина отступала, сохраняя за собой функции первичного двигателя. Функции вторичного двигателя закреплялись за электрическим двигателем. Сначала электродвигатели устанавливались для привода отдельных

машин и станков большой мощности. Затем в старых цехах промышленных предприятий стали заменять паровые машины, приводившие в движение трансмиссии, электродвигателями. Так возник групповой электропривод, который сохранял многочисленные трансмиссии и подчинял в определенных границах характер работы исполнительного механизма характеру работы центрального приводного электродвигателя. Постепенно практика и имевшие место на ее основе многочисленные научно-технические дискуссии привели к признанию целесообразности одиночного электропривода. Последний вид привода освобождает промышленное предприятие от трансмиссий и главное позволяет работать каждому отдельному исполнительному механизму при наивыгоднейших скоростях, а также позволяет ускорить процесс пуска в ход и изменения направления вращения. Одиночный привод оказал существенное влияние и на конструкцию самого исполнительного механизма. К концу 90-х годов преимущества одиночного электропривода были уже в основном выяснены. При этом надо иметь в виду, что одиночный электропривод мог получить широкое развитие только на базе трехфазного тока, когда каждый отдельный электродвигатель не требует для себя особого внимания и ухода.

Промышленный этап истории электротехники, начавшийся в конце 80-х годов и особенно после 1891 г., характеризуется не только электрификацией силового хозяйства промышленности, но и применением электрической энергии в качестве технологического фактора в различных производствах. Наиболее яркое выражение этого внедрения электричества в технологию мы находим в области электрохимии и электрометаллургии. Заводы по производству алюминия, электролитической меди, карборунда, карбида кальция, высококачественных сталей, выросли, если допустимо такое сравнение, как грибы. При этом значительно повысилась роль гидроэлектрических станций с их дешевой электроэнергией.

Централизованное производство электроэнергии позволило в широких масштабах приступить к электрификации городского и пригородного транспорта, а также заводских и рудничных желез-

ных дорог. В 90-х годах стали переводить на электрическую тягу отдельные магистральные железные дороги.

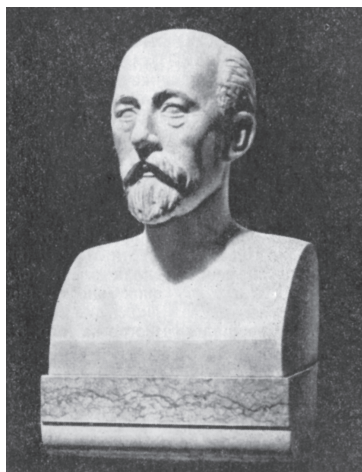
Таким образом, с изобретением трехфазного двигателя, с решением проблемы электропередачи, с возникновением техники трехфазного тока начался все ускоряющийся и расширяющийся процесс реконструкции промышленности, транспорта, а затем и сельского хозяйства, процесс массовой электрификации.

Краткий обзор развития электротехники после 1891 г. и сравнение его с обзором состояния электротехники 80-х годов достаточно определено, по нашему мнению, указывают место, которое занимает в истории электротехники М.О.Доливо-Добровольский. Его творчество явилось мостом, переброшенным от зарождавшейся электротехники к применениям электричества в промышленных масштабах от первых осветительных электроустановок к массовой электрификации, от века пара к веку электричества.

Заслуги М.О.Доливо-Добровольского не остались не признанными или непонятыми. Еще при его жизни все объективные люди, имевшие отношение к электротехнике, понимали громадную значимость его труда. Не было недостатка в исторических обзорах и технических докладах, в которых подчеркивалась его роль в развитии электротехники. И если порой рядом с Доливо-Добровольским называли других изобретателей и ученых, таких как Тесла, Феррарис, Хазельвандер, то речь обычно шла о датах первых выступлений или открытий, но не о роли этих изобретателей в практическом развитии техники трехфазного тока.

Официальное признание заслуг М.О.Доливо-Добровольского перед наукой и техникой выразилось в присвоении ему почетных званий. В 1903 г. Совет Петербургского электротехнического института (ныне ЛЭТИ) присудил Доливо-Добровольскому звание почетного инженера-электрика [Л. 225]. В 1911 г. Высшая техническая школа в Дармштадте избрала его почетным доктором-инженером [Л. 226].

Почти все электротехнические журналы мира с глубокой скорбью известили в 1919 г. своих читателей о смерти выдающегося деятеля



*Скульптурный портрет
М.О.Доливо-Добровольского
(Музей истории техники
в г. Мюнхене).*

электротехники. Многие журналы поместили некрологи, в которых дали самую высокую оценку его трудам. Это была большая утрата для всего электротехнического мира. Особенно тяжела была она для русских электротехников, которые, спустя всего один год после смерти М.О.Доливо-Добровольского, составили знаменитый план электрификации Советской России. В тяжелых условиях иностранной военной интервенции был разработан грандиозный план преобразования великой страны. Сворачивалось многое из того, о чем мечтали поколения передовых представителей русского народа, о чем, вероятно, мечтал и бывший студент Рижского политехнического института, изгнанный из его стен за свои политические убеждения. О смерти Михаила Осиповича на его родине узнали только в 1922 г. [Л. 227].

Советские люди свято чтут память выдающегося русского электротехника. 1 декабря 1927 г. Политехническое общество специально собралось на общее собрание в Физической аудитории института народного хозяйства имени Г.В.Плеханова, чтобы почтить память

Михаила Осиповича Доливо-Добровольского. Теперь имя М.О.Доливо-Добровольского можно встретить на страницах отечественной и зарубежной периодической печати. Его портрет украшает и школьный учебник и научную монографию, стены учебного заведения и корпус завода.

Однако самый лучший и долговечный памятник М.О.Доливо-Добровольскому был создан им самим — это техника трехфазного тока, это другие его изобретения. Строительство линии электропередачи протяженностью 1 000 км и более напоминает о М.О.Доливо-Добровольском, в каждом из асинхронных двигателей и трехфазных трансформаторов, выпускаемых тысячами сериями, заложена частица его труда. Измерительные приборы и выключатели высокого напряжения напоминают о том, что и их коснулась рука замечательного электротехника. Готовясь осуществить передачу громадного количества электроэнергии постоянным током, мы идем по пути, указанному М.О.Доливо-Добровольским.

Техника трехфазного тока — это, можно сказать, и есть современная электротехника, ибо подавляющее количество электроэнергии вырабатывается ныне в форме трехфазного тока. Если у истоков прикладного учения об электричестве стояли В.В.Петров, А. Ампер, М.Фарадей, если у колыбели электротехники находились Б.С.Якоби, З.Грамм, П.Н.Яблочков, Т.А.Эдисон и др., то первые шаги современной электротехники были сделаны под уверенным руководством М.О.Доливо-Добровольского. Рассказать о его жизни — это значит рассказать о зарождении техники трехфазного тока, о становлении новейшей электротехники, о начале электрификации. Имя Михаила Осиповича Доливо-Добровольского принадлежит истории, и оно не будет забыто.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. БИБЛИОГРАФИЯ

А. Труды М.О. Доливо-Добровольского¹

1. О соотношении различных величин при заряджении вторичных батарей, «Электричество», 1884, № 8, стр. 67–70.
2. Заметки по теории и практике электролиза, «Электричество», 1885, № 5–6, стр. 33–36.
3. Несколько слов о брошюре проф. О. Лоджа: «О местонахождении электровозбудительных сил в гальванических элементах», «Электричество», 1885, № 5–6, стр. 46–48.
4. Передача энергии посредством переменных токов различных фаз (Drehstrom), *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1891, № 12, S. 149–156 и № 13, S. 161–165; *Electrician*, vol. XXVII, № 690, p. 388–392; Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948, стр. 21–52.
5. О международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне, выступление в Электротехническом обществе 24 марта 1891 г., опубликовано в *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1891, № 18, S. 238–240.
6. Многофазный ток и его развитие, *Die Elektrizität. Offizielle Zeitung der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung*, Frankfurt am Mein, 1891, № 12, S. 333–336.
7. Передача электроэнергии посредством переменного тока, Доклад на заседании II секции Международного конгресса электротехников 9 сентября 1891 г., *Bericht über die Verhandlungen*

¹ В список трудов не включены многочисленные выступления М.О. Доливо-Добровольского в Электротехническом обществе, которые делались в порядке обсуждения докладов других членов Общества. На использованные в этой книге выступления делаются в тексте ссылки непосредственно на соответствующую страницу журнала.

- der Sections-Sitzungen des Internationalen Elektrotechniker Congresses zu Frankfurt am Main. Vom 7. bis. 12. September 1891, Франкфурт-на-Майне, 1892, S. 151–160.
8. Письмо редактору о формуле д-ра М. Корсепиуса, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1891, № 29, S. 392.
 9. Особые явления при токах высокого напряжения, Сообщение в Электротехническом обществе 24 ноября 1891 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1891, № 52, S. 708.
 10. Собственная защита обыкновенных телефонных проводов, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1892, № 12, S. 156.
 11. Борьба с индукцией в телефонных проводах, Сообщение в Электротехническом обществе 22 марта 1892 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1892, № 16, S. 211–213.
 12. О коэффициенте полезного действия передачи энергии Лауфен-на-Неккаре – Франкфурт-на-Майне. Сообщение в Электротехническом обществе 5 апреля 1892 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1892, № 16, S. 211.
 13. О коэффициенте полезного действия трансформатора, Доклад в Электротехническом обществе 22 марта 1892 г., Опубликовано: *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1892, № 17, S. 222–226 и другие журналы; Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948, стр. 53–74.
 14. Ответ на статью Ч. Броуна о его двигателе переменного тока, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1893, № 13, S. 178–180 и № 20, S. 283–285.
 15. Новейшие двигатели трехфазного тока без скользящих контактов Всеобщей Компании Электричества, Сообщение в Электротехническом обществе 28 февраля 1893 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1893, № 13, S. 183–184.
 16. К вопросу об узаконении электрических единиц измерений, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1893, № 21, S. 295–298.
 17. Машина постоянного тока для трехпроводной системы. Доклад на годовом собрании Союза германских электротехников, 7–9 июня 1894 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1894, № 23, S. 323–324.

18. Прибор для определения разности фаз при переменном токе, Доклад в Электротехническом обществе 22 мая 1894 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1894, № 25, S. 350–352.
19. Регулирование фаз в установках переменного тока, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1894, № 40, S. 555–556.
20. Машины трехфазного и однофазного токов Всеобщей компании электричества, Доклад в Электротехническом обществе 22 января 1895 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1895, № 6, S. 95–96, № 12, S. 181.
21. О сдвиге фаз переменного тока при электролизе, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1895, № 25, S. 381–382.
22. Измерение мощности трехфазного тока, Письмо в редакцию, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1896, № 14, S. 226.
23. Интервью М. О. Доливо-Добровольского корреспонденту журнала, *Electrical Engineer*, vol. XVIII (New Series), 1896, p. 118–120.
24. О якоре из массивного железа для электродвигателей трехфазного тока, Сообщение в Электротехническом обществе 2 июня 1896 г., Опубликовано: *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1896, № 28, S. 445–446; *Electrician*, vol. 39, p. 540; *Electrical Engineer*, vol. 20, p. 170.
25. Соображения о якорях с закрытыми и открытыми пазами. Доклад на годовом собрании Союза германских электротехников 10–13 июня 1897 г., Опубликован: *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1897, № 30, S. 429–430; *Electrician*, 1897, vol. 39, p. 540; *Electrical Engineer*, 1897, vol. 20, p. 170.
26. Присоединение нейтрального провода к трехфазным трансформаторам, *AEG-Zeitung*, 1898, № 3, S. 5–8.
27. Отчет о случае смерти рабочего на сахарной фабрике Розитцера *AEG-Zeitung*, 1898, № 3, S. 17–19.
28. Так называемая «абсолютная система мер», Доклад для сотрудников фирмы *AEG-Zeitung*, 1899, № 5, S. 1–8 и № 6, S. 1–9.
29. Современное развитие техники трехфазного тока. Доклад на Первом Всероссийском электротехническом съезде 28 декабря 1899 г. (ст. стиля), Опубликован: Труды первого Всероссийского

- электротехнического съезда 1899–1900 г., т. 2, стр. 1–30; «Электричество», 1900, № 4, стр. 49–57 и № 5–6, стр. 65–78; Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948, стр. 75–123.
30. Включение трансформаторов для питания многопроводных устройств, Сообщение в Электротехническом обществе 26 февраля 1901 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1901, № 12, S. 265–266 и № 19, S. 407.
 31. Новые способы уменьшения падения напряжения на рельсах, используемых в качестве обратного провода на электрических железных дорогах. Письмо в редакцию 17 декабря 1901 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1902, № 1, S. 22.
 32. Трехфазный двигатель с изменяемым числом полюсов, Письмо в редакцию 8 апреля 1909 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1909, № 18, S. 433.
 33. Как измерить электрический ток? Общедоступный доклад для служащих фирмы 6 апреля 1910 г., *АЕG-Zeitung*, 1919, № 11, S. 1–4; № 12, S. 6–8 и № 2, S. 14–15.
 34. Современное массовое производство на электроаппаратостроительном заводе АЭГ, Доклад для сотрудников и клиентов фирмы *АЕG-Zeitung*, 1912, № 8, S. 1–4, № 9, S. 3–5 и № 10, S. 6–11.
 35. Об использовании железа в электрических измерительных приборах, Доклад в Электротехническом обществе 22 октября 1912 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1913, № 5, S. 113–116.
 36. Взгляд на Международную электротехническую выставку во Франкфурте-на-Майне 1891 г. Выступление на годовом собрании Союза германских электротехников 3 июня 1916 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1916, № 34, S. 461–463.
 37. Из истории трехфазного тока, Доклад в Электротехническом обществе 1 ноября 1916 г., Опубликован: *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1917, S. 341–344, 354–357, 366–369, 374–377; Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948, стр. 125–188.
 38. Беличья клетка двигателей трехфазного тока, Письмо в редакцию 5 марта 1918 г., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1918, № 14, S. 140.

39. О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния, Доклад в Электротехническом обществе 26 ноября 1918, Опубликовано: *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1919, S. 1–4, 84–87; Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948, стр. 189–205.

Б. Основная литература о М.О.Доливо-Добровольском и его трудах

40. Белькинд Л. Д., М.О.Доливо-Добровольский, К двадцатипятилетию со дня смерти, «Электричество», 1945, № 3.
41. Белькинд Л. Д., Михаил Осипович Доливо-Добровольский (биографическая справка), В книге: М.О.Доливо-Добровольский. Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948, стр. 207.
42. Белькинд Л. Д., Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862–1919), Сборник: Люди русской науки, Гостехиздат, М. – 1948, т. II.
43. Брон О. Б., М.О.Доливо-Добровольский – изобретатель искрогасительной решетки, «Электричество», 1949, № 9 и 1953, № 5.
44. Веселовский О. Н., Роль М.О.Доливо-Добровольского в развитии теории переменного тока, «Электричество», 1954, № 7.
45. Веселовский О. Н., О некоторых работах М.О.Доливо-Добровольского, «Электричество», 1956, № 1.
46. Веселовский О. Н., Зарождение и развитие техники трехфазного тока. Гл. XV книги: Л. Д. Белькинд, И. Я. Конфедеров, Я. А. Шнейберг, История техники, ГЭИ. 1956.
47. Гусев С. А., Первая линия электропередачи с применением трехфазного тока, «Электричество», 1952, № 7.
48. Гусев С. А., Об изобретении короткозамкнутого ротора с двухрядной беличьей клеткой, «Электричество», 1954, № 4.
49. Доливо-Добровольский, Некролог, *Elektrotechnischer Anzeiger*, 1919, № 140, S. 670.
50. Доливо-Добровольский, Некролог, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1920, № 1, S. 12 и *Zeitschrift d. VDI*, 1920, № 6, S. 137.

51. Доливо-Добровольский – велосипедист, *Spannung* (AEG – Umschau), Jahrgang, 3, 1929, № 4, S. 122.
52. Каплянский А. Е., Работы М. О. Доливо-Добровольского по созданию электроизмерительной техники переменного тока. «Электричество», 1952, № 1.
53. Кржижановский Г. М., Работы М. О. Доливо-Добровольского и их значение, В книге: М. О. Доливо-Добровольский, Избранные труды (о трехфазном токе), ГЭИ, 1948.
54. Лузин С., Основоположник техники трехфазного тока, Военный связист, 1950, № 4.
55. Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862–1919), К двадцатипятилетию со дня смерти, «Электричество», 1944, № 11–12
56. О параметрах первой электропередачи М. О. Доливо-Добровольского, «Электричество», 1952, № 1.
57. Памяти Михаила Доливо-Добровольского, *Spannung* (AEG – Umschau), Jahrgang 3, 1929, № 2, S. 44.
58. Передача работы на расстояние посредством многофазных токов М. О. Доливо-Добровольского, Сборник: Очерк работ русских по электротехнике с 1800 по 1900 г. Под ред. Я. И. Ковальского. Спб. 1900, стр. 60.
59. Угримов Б. И., К сорокалетию трехфазной системы, «Вестник инженеров», 1928, № 5, стр. 263.
60. Угримов Б. И., 50 лет трехфазного тока, «Электричество», 1940, № 1.
61. Франкфурт Я. Л., Труды М. О. Доливо-Добровольского в оценке его современников, «Электричество», 1955, № 4.
62. Хащинский В., Памяти Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, «Электричество», 1930, № 5.
63. Цукерник Л. В., Роль М. О. Доливо-Добровольского в создании схем компаундирования синхронных машин, «Электричество», 1952, № 11 (в этой статье приведены все чертежи из патентов Доливо-Добровольского).
64. Шателен М. А., Русские электротехники XIX века, ГЭИ, 1955.

65. BIRNHOIZ J., M. Dolivo-Dobrowolsky, Deutsche biographisches Jahrbuch, Bd. II, 1917–1920; Berlin u. Leipzig, 1928, S. 770.
66. А.СОННИ. V.УЛВРИСН, Искрогасительные камеры для воздушных выключателей Доливо-Добровольского, Forschung und Technik im Auftrage der Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, herausgcgeben von W. Petersen, Berlin, 1930, S. 333.
67. МÖVUS W., Михаил Доливо-Добровольский, Elektrotechnische Zeitschrift, 1954, № 3, S. 76.
68. SCHÜLER L., Изобретение трехфазного электродвигателя, Elektrotechnik, Bd. 2, 1948, № 3, S. 93.

В. Прочая использованная литература

Глаза первая

69. 1) Album Academicum Рижского политехнического института, Запись № 1442.
2) Главный студенческий реестр Рижского политехнического института, Запись № 1442.
70. Центральный Государственный исторический архив в Ленинграде (ЦГИАЛ), фонд 733, опись 149, дело 157464, листы 1–5.
71. SENGEI, А. ЭРАЗМ КИТТЛЕР, ETZ, 1929, № 16, S. 588.
72. Динамомашина в ее историческом развитии, Документы и материалы. Составили Д.В.Ефремов и М.И.Радовский, под ред. В.М.Миткевича, АН СССР, Л., 1934.
73. Миллер О., Всемирная электрическая выставка во Франкфурте-на-Майне, «Почтово-телеграфный журнал», 1891, № 18, Неофициальный отдел, стр. 797.
74. Дуэль на переменном и постоянном токах, ETZ, 1889, S. 114.
75. МЕЙСНЕР Г. Передача силы на далекие расстояния и устройство передаточных механизмов и регуляторов, тт. I и II, Спб. 1900–1905.
76. Муравцов Л., Курс электротехники для Комиссаровского технического училища, М. 1906/07, (литографированное издание).

77. СТРАУС О., Электрическая выставка VI Отдела ИРТО. «Электричество», 1882.
78. ETZ, 1888, S. 236.
79. Белькинд Л. Д., Павел Николаевич Яблочков. ГЭИ, 1950.
80. HERING CARL. Электрическая энергия, получаемая непосредственно при холодном горении светильного газа, Electrical World, vol. XXV, 1895, № 8, p. 220.
81. CONRAD MATSCHNOSS. Die geschichtliche Entwicklung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in den ersten 25 Jahren ihres Bestehens, Berlin, 1909.
82. ЛЕНИН В. И., Соч., т. 22, стр. 234.
83. ETZ, 1891, № 6, стр. 80.

Глава вторая

84. Томпсон С. П., Многофазные электрические токи и двигатели переменного тока, Спб., 1898.
85. ФАРАДЕЙ М., Экспериментальные исследования по электричеству, т. I, АН СССР, 1947.
86. ТНОМРСОН S. P., Первый многофазный двигатель. Electrician, 1895, стр. 99.
87. La Lumière Electrique, 1880, vol. H, p. 238.
88. DEREZ M., Об электрическом синхронизме двух относительных движений и о его применении для построения новой электрической буассоли, Comptes Rendus hebdomadaires des Séances de l'Academie des Sciences, vol. 2, 1883, p. 1193.
89. FERRARIS, Электродинамическое вращение, производимое посредством переменных токов, Electrician, vol. XXVI, № 9. 1895, стр. 81, Перевод с итальянского из Atti della R. Accadem. delle scienze di Torino, 1888, стр. 360.
90. Bericht über die Verhandlungen der Sections-Sitzungen des Internationalen Elektrotechniker Congresses zu Frankfurt am Main, Frankfurt a. Main, 1892.
91. ETZ, 1888, № 24, S. 568.
92. ETZ, 1892, № 29, S. 393.

93. ЖЕРАР ЭРИК, Курс электричества, Перевод М.А.Шателена, Спб., изд. II, т. I, 1896, т. 2, 1897.
94. Швейцарский патент № 3968 от 12 сентября 1891 г.
95. ETZ, 1891, № 23, S. 301.
96. BROWN C.E.L., Асинхронный двигатель для обычного переменного тока, ETZ, 1893, № 7, S. 81, Ответ М.О.Доливо-Добровольскому— там же, № 20, стр. 283 и 285.
97. BROWN C.E.L., Еще раз Лауфен, Prometheus (Berlin), 1891, № 109, S. 65.
98. Томпсон Сильванус, Многофазные электрические токи и двигатели переменного тока, Перевод М.А.Шателена, Спб., 1898.
99. ETZ. 1892, S. 236.
100. ВЕСЕЛОВСКИЙ О.Н., Электротехнические выставки в России в конце XIX в., Труды по истории техники, АН СССР, вып. VI, М., 1953.
101. «Helios», Передача энергии переменным током, полученным посредством особого соединения в машинах постоянного тока, Германский патент № 43538, заявлен 12 мая 1887 г.
102. Official Gazette, vol. 45, p. 71.
103. Official Gazette, vol. 47, p. 1252.
104. Official Gazette, vol; 48, p. 1061.
105. ETZ, 1893, № 14, S. 206.
106. ДЕТТМАР G., Die Entwicklung der Starkstromtechnik in Deutschland Bd. I, Berlin, 1940.
107. Система распределения электроэнергии посредством многофазных (вращающих) токов Хазельвандера, Elektrizität. Offizielle Zeitung der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung, Frankfurt a. Alain, 1891, № 1, S. 10.
108. Система электропередачи переменного тока, Германский патент Фридриха Аугуста Хазельвандера, № 55978, заявлен 30 июня 1889 г., выдан 24 апреля 1891 г.
109. Аннулирование патента Хазельвандера на трехфазный ток, ETZ, 1892, № 25, S. 334.

110. ETZ, 1891, № 18, S. 225.
111. ХАЗЕЛЬВАНДЕР, Фридрих Аугуст, ETZ, 1932, № 15, S; 373.
112. Slavko Boksan, Nikola Tesla und sein Werk und die Entwicklung der Elektrotechnik, der Hochfrequenz und Hochspannungstechnik und Radiotechnik, Leipzig – Wien – New-York, 1932.
113. MARTIN T.C., Nikola Tesla's Untersuchungen über Mehrphasenströme und über Wechselströme hoher Spannung und Frequenz, Halle a. S., 1895.
114. БОКШАН Славко, Никола Тесла и его дело, Белград, 1946.
115. Никола Тесла, Юбилейный сборник, Белград, 1936.
116. БЕЛЬКИНД Л. Д., Павел Николаевич Яблочков, Жизнь и труды, ГЭИ, 1950.
117. STEINMETZ, Многофазные двигатели, ETZ, 1894, № 4, S. 45.
118. Electrical World, N. Y., 1889, vol. XIV, p. 9 или ETZ, 1889, № 19, S. 473.
419. СКОТТ Сн.Ф., Вклад Тесла в электроэнергетику, Electrical Engineering, 1943, № 8, p. 351.
120. ЛАММЕ В.Г., История индукционного двигателя, Journal of AIEE, 1921, vol. XL, p. 203.
121. «Техник», 1882, № 3, стр. 15.

Глава третья

122. КИТТЛЕР Е., Allgemeine Elektrotechnik, Stuttgart, 1909.
123. ПЕТЕРС Б., Несколько слов о способах устранения неудобств, возникающих при пользовании трехфазными токами для освещения, «Электричество», 1897, № 23–24, стр. 321.
24. ГОСПИТАЛЬЕ Эд., Многофазные переменные токи, «Электричество», 1892, № 19, стр. 255.
125. Швейцарский патент № 1885.
126. КАРР Г., Графическое исследование индукционной катушки, Elektrician, 1887.
127. А. du Bois-Reumond, Выступление на Международном конгрессе электротехников во Франкфурте-на-Майне. ETZ, 1891, S. 703.

128. ROESSLER, Параллельное и последовательное соединение при переменных токах, имеющих произвольную форму кривой, ETZ. 1898, S. 595.
129. Г. Ш.-Международный конгресс электротехников в Женеве. «Электричество», 1896, № 21 – 22, стр. 301.

Глава четвертая

130. ВЕСЕЛОВСКИЙ О.Н., Электротехнические выставки в России в конце XIX в., Труды по истории техники, выпуск VI, АН СССР, 1953.
131. ETZ, 1890, № 19, S. 277.
132. О.Фон Миллер, Всемирная электрическая выставка во Франкфурте-на-Майне, «Почтово-телеграфный журнал», 1891, № 18. Неофициальный отдел, стр. 791.
133. Die Elektrizität, Offizielle Zeitung der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung, Frankfurt a. Main, 1891.
134. ETZ, 1890, № 30, S. 409.
135. ETZ, 1890, № 32, S. 441.
136. ETZ, 1891, № 8, S. 107.
137. ETZ, 1891, № 20, S. 262.
138. 50-летие Лауфенской электропередачи, Bulletin des Schweizerischen Vereins, 1941, № 18, S. 425.
139. ETZ, 1891, № 87, S. 493.
140. MÜLLER KARL E., 50-летие электропередачи трехфазным током, Bulletin Oerlikon, 1941, № 231, S. 1437.
141. МАУ О., Предварительный опыт машиностроительного завода Эрликон в связи с электропередачей Хейльбронн – Франкфурт. Elektrotechnischer Anzeiger, 1891. № 13, S. 217.
142. LINDNER TH., Электропередача трехфазного тока Лауфен – Франкфурт, AEG – Mitteilungen, 1941, № 5/6, S. 121.
143. Offizieller Bericht über die Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main 1891, herausgegeben vom Vorstand der Ausstellung, I. Allgemeine Bericht. Frankfurt a. Main, 1893. II. Bericht über die Arbeiten der Prüfungs-Kommission, Frankfurt a. Main, 1894.

144. Классон Р., По поводу официального отчета о работах испытательной комиссии при электротехнической выставке во Франкфурте в 1891 г., «Электричество», 1894, № 18.
145. ETZ, 1892, № 16, S. 211.
146. «Электричество», 1892, № 3, стр. 45.
147. Результаты лауфенской электропередачи, ETZ, 1892, № 3, S. 40.
148. ETZ, 1893. 3, S. 35.
149. Elektrotechnischer Anzeiger, 1891, № 89, S. 1629.
150. ETZ, 1891, № 39, S. 519.
151. См., например, ETZ, 1891, № 41, S. 547.
152. Капп Г., Лауфен – Франкфуртская передача энергии. Перевод статьи опубликован в журнале «Электричество», 1891, № 20.
153. Капп Г., Электрическая передача энергии, ее преобразование, подразделение и распределение, Перевод с 3-го английского изд. Д. Голова, Спб., 1893.
154. Госпиталье Эд., Многофазные переменные токи, Сообщение в Международном обществе электриков в Париже, «Электричество», 1892, № 19.
155. Успехи электричества и его применения в 1891 г., «Электричество», 1892, № 1.
156. Миллер О., Энергетическое хозяйство за истекшее столетие, «Энергетическое обозрение», 1931, № 3.

Глава пятая

157. ETZ, 1891, № 45, S. 597.
158. Мейер В., Традиции и развитие промышленных трехфазных двигателей, AEG-Mitteilungen, 1954, № 3/4, S. 77.
159. ETZ, 1897, № 31, S. 480.
160. ETZ, 1897, № 31, S. 482.
161. Келли Дж., Очерк развития индукторных альтернаторов, «Электричество», 1897, № 5.
162. Нотар А., Электрическая передача энергии водопада Лавола, в Финляндии, в г. Выборг, «Электричество», 1901, № 23, стр. 329.

163. Угримов Б., Новые динамомашины. «Технический сборник и вестник промышленности», 1896, № 1.
164. SEIDNER M., Новая система регулирования для генераторов переменного тока, ETZ, 1908, № 18.
165. SEIDNER M., Методы автоматического регулирования генераторов переменного тока, их принцип и критика, ETZ, 1909, № 51, S. 1236.
166. ETZ, 1889, № 24, S. 599.
167. ETZ, 1890, № 21, S. 305.
168. HAAS R., Письмо в редакцию. ETZ, 1901, № 17, S. 374.
169. GOBENZ A., Письмо в редакцию, ETZ. 1901, № 19, S. 407.
170. ETZ, 1898, № 45, S. 750.
171. ETZ, 1891, № 6, S. 80.
172. Отчет о Втором годовом собрании Союза германских электротехников, Лейпциг, 8 и 9 июня 1894, ETZ, 1894, № 49, S. 671.
173. BRAUN R., О реакции якоря в трехфазных генераторах, Доклад и дискуссия, ETZ, 1897, № 25, S. 365. Выступление в дискуссии М.О.Доливо-Добровольского опубликовано там же, стр. 369–370.
174. МИТКЕВИЧ В.Ф., К вопросу о зубчатых арматурах, «Электричество», 1898, № 6, стр. 87.
175. ШЕНФЕР К.И., Динамомашины и двигатели постоянного тока, ОНТИ, 1934.

Глава шестая

176. VOGELSANG M., Die geschichtliche Entwicklung der Hochspannungs Schalttechnik, Berlin, 1929.
177. ЖЕРАР, Э., Курс электричества, Перевод М. А. Шателена, Изд. II, Спб., 1896–1897.
178. Первые сведения о деионной решетке были опубликованы Слепяном в Transaction of American Institut of Electr. Eng., vol. 47, p. 1398.
Применение деионной решетки в контакторах было описано в статье инженеров фирмы Вестингауз Беккера и Элліса

- в Electric Journal, vol. 26, p. 337. В ETZ сведения об этих работах были опубликованы в 1929 г. в № 19 и 39 на стр. 686 и 1416.
179. Сонн А., Деионный выключатель для двигателей, ETZ, 1929, № 52, S. 1890.
 180. ВIERMANN S. J., Из истории техники высоких напряжений, AEG-Mitteilungen, 1953, № 9/10, S. 234.
 181. Смуров А.А., Электротехника высокого напряжения и передача энергии, т. 1, изд. 3, ГОНГИ, 1932.
 182. Аранович И.С. (ред.), Аппаратура распределительных устройств высокого напряжения, ГОНТИ, 1938.
 183. КИТТЛЕР E., Handbuch der Elektrotechnik, Bd. I, Stuttgart, 1892.
 184. Измерители тока и напряжения Всеобщей компании электричества в Берлине, ETZ, 1890, № 22, S. 309.
 185. ССНМОЛЛЕР, Об исследовании железа относительно потерь на перемагничивание, Сообщение в заседании Электротехнического общества 26 апреля 1892 г. о приборе М.О.Доливо-Добровольского, ETZ, 1892, № 30, S. 406.
 186. ETZ, 1900, S. 303.
 187. МEYER G.W., Частотомер, Zeitschrift für Elektrotechnik (Wien), 1897, № 18, S. 513. Краткое реферативное сообщение о частотомерах Мейера и Доливо-Добровольского было помещено в журнале «Электричество», 1897, № 21, стр. 300.
 188. ВЕНН-ЕСЧЕНБУРГ, Измерение мощности трехфазных токов. ETZ, 1896, № 12, S. 182.
 189. КЕЙНАТ Г., Электроизмерительная техника, КУБУЧ, 1935, т. 1.
 190. RZINAU. SEIDENER, Starkstromtechnik, Taschenbuch für Elektrotechnik; Bd. I и II, Berlin, 1922–1930.
 191. Обзор успехов электротехники в 1893 г., «Электричество», 1894, № 1.

Глава седьмая

192. ETZ, 1892, № 12, S. 156; там же, № 14, S. 187; там же, № 16, S. 211.
193. Михайлов М.И. и Азбукин П.А., Воздушные и кабельные линии связи и их защита, ч. 111, Связьиздат, 1940.

194. КаппГ., Электрическая передача энергии, ее преобразование, подразделение и распределение, Лондон, 1894, Русский перевод с 3-го английского изд. Д. Голова, Спб., 1893.
195. ШЕНФЕР К.И., Динамомашин и двигатели постоянного тока, изд. 5-е. ОНТИ, 1937.
196. ИМНОФФ С.Л., Новое в динамомашин, ETZ, 1890, № 2, S. 26.
197. «Электричество», 1893, № 7, стр. 104.
198. Динамомашин для трехпроводных сетей, Electrical World (N.-Y.) vol. 50, 1907, № 3, p. 131.
199. ETZ, 1895, S. 548.
200. См. дискуссию по докладу М.О.Доливо-Добровольского в ETZ 1919, № 8, S. 84–87 и в Е. и. М., 1919, № 12, S. 120–121.

Глава восьмая

201. ETZ, 1889, S. 553.
202. ETZ, 1890, № 21, S. 305.
203. ETZ, 1892, S. 77.
204. 50 Jahre Elektrotechnischer Verein (1879–1929). Berlin, 1929.
205. ПЕТРОВ Н.П., Приветственная речь при открытии Первого Всероссийского электротехнического съезда, «Электричество», 1900, № 1–2.
206. ЦГИАЛ, фонд. 25, оп. I, дело 1477, листы 2–4.
207. Там же, лист 10.
208. ГИАЛО, фонд 478, опись 23, дело 98.
209. Там же, листы 5–6.
210. ETZ, 1900, № 51, S. 1071.
211. См., например, «Пермские ведомости», № 122 от 8 июня 1901 г.
212. ГИАЛО, фонд 478, опись 23, дело 98, листы 9–17.
213. Там же, листы 13–14.
214. Там же, лист. 35.
215. По воспоминаниям рецензента настоящей книги проф. Л.М.Пиотровского.
216. ETZ, 1892, № 6, S. 81.

- 217. Сушкин, Заводы Всеобщей компании электричества в Берлине. «Бюллетени Политехнического общества», 1901, № 5, стр. 282.
- 218. Научная экскурсия в Берлин наших студентов-электротехников, «Электротехнический вестник», 1903, стр. 22
- 219. Изобретение радио А.С.Поповым, Сборник документов и материалов, АН СССР, 1945, стр. 201.
- 220. Доливо-Добровольский-велосипедист. Spannung (AEG-Umschau), Jahrgang 3, 1929, № 4, S. 122.

Глава девятая

- 221. Материалы о промышленной лауфенской гидроэлектростанции можно найти в следующих источниках: «Электричество», 1892, № 2, стр. 32; ETZ, 1892, № 5, S. 63; ETZ, 1892, № 15, S. 193; ETZ, 1893, № 2.
- 222. «Электричество», 1891, № 5, стр. 65.
- 223. «Электричество», 1892, № 1, стр. 1.
- 224. Подробные сведения об этой установке можно найти в статье: С.А.Гусев, Первая русская установка трехфазного тока, «Электричество», 1953, № 12.
- 225. 50 лет ЛЭТИ, ГЭИ, 1948.
- 226. ETZ, 1911, № 44, S. 1118.
- 227. Телеграфия и телефония без проводов, 1922, № 12, стр. 246.

II. ПРИВИЛЕГИИ И ПАТЕНТЫ

М. О. ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКОГО

№ п/п	Наименование изобретения	Страна, в которой получен патент	№ патента	Дата		Сущность изобретения
				Заявки	Выдачи	
1	Усовершенствования в соединениях генераторов и двигателей переменного тока	Англия	19554	5.12.1889	18.10.1890	Схемы связанных цепей трехфазного тока
2	Новое в соединении генераторов и двигателей переменного тока	Швейцария	1885	8.1.1890		
3	Усовершенствования в коммутации электрических генераторов и двигателей с переменными токами	Россия	93	30.11.1891	18.8.1893	
4	Уравнительный провод для распределительных установок трехфазного тока	Германия	71137	2.4.1890	12.10.1893	Четырехпроводная цепь трехфазного тока и автотрансформатор
5	Улучшенные средства для распределения электричества	Англия	13260	22.8.1890	27.6.1891	
6	Новая система распределения электричества	Россия	205	30.11.1891	10.12.1893	

7	Усовершенствования в электрических машинах и аппаратах для многофазных токов	Англия	13503	10.8.1891	31.10.1891	Двойное сопряжение
8	Новое в соединениях электрических аппаратов, которые должны генерировать или потреблять многофазные токи	Швейцария	4160	10.8.1891		
9	Электрическая машина	США	469515	3.8.1891		
10	Система генерирования, регулирования и передачи многофазных токов	Германия	79528	23.12.1890	16.2.1895	Преобразование числа фаз с помощью трансформаторов
11	Усовершенствования в распределении электричества переменными многофазными токами	Англия	3191	21.2.1891	4.4.1891	Преобразование числа фаз с помощью трансформаторов
12	Передача многофазных переменных токов	США	455683	28.3.1891		
13	Якорь для двигателей переменного тока	Германия	51083	8.3.1889	19.4.1890	Короткозамкнутый ротор („беличья клетка“)
14	Усовершенствования в электродвигателях	Англия	10933	6.7.1889	19.4.1890	
15	Усовершенствования во вторичных электрических машинах	Россия	94	24.2.1892	18.8.1893	

№ п/п	Наименование изобретения	Страна, в которой получен патент	№ патента	Дата		Сущность изобретения
				Заявки	Выдачи	
16	Изготовление обмотки индуктора электродвигателей переменного тока	Германия	56757	1.1.1.1890	30.5.1891	Двигатели с вспомогательными трансформаторами
17	Усовершенствование в электродвигателях переменного тока	Англия	20424	15.12.1890	31.1.1891	
18	Новое в электродвигателях переменного тока	Швейцария	2991	19.12.1890		
19	Двигатель переменного тока	Россия	456804	23.12.1890		
20	Усовершенствование в регулировании скорости и мощности двигателей переменного тока	Англия	20425	15.12.1890	31.1.1891	Фазовый ротор и пусковой реостат
21	Двигатель переменного тока, приводимый в действие многофазными токами с устройством для регулирования скорости и пускового усилия	Швейцария	3062	19.12.1890		
22	Пусковое устройство для трехфазных двигателей	Германия	75361	15.1.1893	25.5.1894	Автотрансформаторный пуск асинхронного двигателя

23	Пусковое устройство трехфазных двигателей	Швейцария	7476	16.10.1893		
24	Регулировочное устройство для преобразователя постоянного тока в переменный	Германия	112064	11.12.1898	20.8.1900	Вольтодобавочная машина для регулирования напряжения однофазного преобразования
25	Обмотка якоря для двигателей, которые приводятся в действие пульсирующими переменными токами, сдвинутыми относительно друг друга по фазе	Германия	212424	30.6.1908	20.7.1909	См. в гл. 5
26	Устройство для уменьшения падения напряжения (компаундирование) на зажимах однофазных машин переменного тока	Германия	148074	23.11.1902	10.2.1904	Схема компаундирования
27	Устройство для компаундирования самовозбуждающихся однофазных машин переменного тока	Германия	145446	5.12.1902	19.11.1903	

№ п/п	Наименование изобретения	Страна, в которой получен патент	№ патента	Дата		Сущность изобретения
				Заявки	Выдачи	
28	Трансформатор для многофазных переменных токов	Германия	56359	29.8.1889	22.5.1891	Трехфазные трансформаторы
29	Новое в электрических трансформаторах	Швейцария	1184	8.1.1890		
30	Усовершенствования в электрических трансформаторах	Россия	95	17.2.1892	18.8.1893	
31	Электрический индукционный аппарат или трансформатор	США	422746	8.1.1890		
32	Усовершенствования в электрических индукционных аппаратах или трансформаторах	Англия	19555	5.12.1889	18.10.1890	
33	Трансформатор для многофазных токов	Германия	79608	4.10.1891		Трехфазный трансформатор с параллельным положением стержней в одной плоскости
34	Новое в вольтметрах и амперметрах	Германия	46093	21.4.1888	31.1.1889	Электромагнитные измерительные приборы
35	Усовершенствование в амперметрах и вольтметрах	Англия	9907	7.7.1888	11.5.1889	

36	Устройство для определения физического сдвига между двумя переменными токами	Германия	68215	14.4.1892	22.4.1893	Фазометры и измерители реактивных мощности и тока
37	Аппарат для определения разности между фазами двух переменных токов одинаковой частоты, применимый также для регулирования генераторов переменного тока	Англия	23113	15.12.1893	22.4.1893	
38	Динамометрический измерительный прибор переменного тока, в особенности ваттметр, с магнитопроводом, состоящим в основном из железа	Германия	235913	27.11.1909	22.6.1911	Ферродинамический ваттметр
39	Устройство для ограничения распространения электрической дуги в высоковольтных электрических аппаратах	Германия	256517	16.9.1910		Методы гашения электрической дуги и конструкции дугогасительных устройств
40	Устройство для ограничения электрической дуги, возникающей при разрыве электрической цепи	Германия	266745	4.5.1912	1.11.1913	
41	Устройство для ограничения электрической дуги, возникающей при разрыве электрической цепи	Германия	272742	24.7.1912	8.4.1914	
42	Методы разрыва электрической дуги и устройства для осуществления этих методов	Германия	293332	23.7.1914	7.8.1916	

№ п/п	Наименование изобретения	Страна, в которой получен патент	№ патента	Дата		Сущность изобретения
				Заявки	Выдачи	
43	Способ соединения для питания трехпроводных установок от одно-го генератора	Германия	73892	27.4.1893	13.8.1894	„Делитель напря-жения“
44	Улучшенная система распределе-ния постоянного тока	Англия	19423	16.10.1893	18.11.1893	
45	Новое в динамомашинах	Германия	47757	19.10.1888	13.7.1889	Введение сталь-ного цилиндра в воздушный зазор машины

III. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Александрсон 194
Ампер 16, 315
Араго 34, 44, 54
Арнольд 174, 194

Б

Баумгарт 212
Бейли 34, 35
Белькинд Л.Д. 8, 9
Бенишке 257, 259
Бен-Эшенбург 174, 256, 257
Бернштейн А. 22
Беттхер 25
Блати 18, 194
Блондель 124
Бокшан 67, 72
Боргман И.И. 310
Борель 39, 50
Боршерс 28
Браун Г. 19
Бредли 56–60, 66, 70, 79, 81, 84, 92, 198
Брон О.Б. 227
Броун 51–53, 81, 104, 112, 133, 140, 144–147, 161, 172, 174, 185,
189, 192, 210, 235, 269
Брук И. С. 16
Бушери 182, 183, 194

В

Вальмслей 55
Варбург 21
Вебер 129, 142, 160
Венштрём 79, 80
Вестингауз 19, 20, 49, 69, 76–79, 107, 181, 194, 227, 239
Винн 54
Витте 291
Вологдин В.П. 193
Вольта 16

Г

Гагарин А. Г. 291–293, 302
Гальвани 16
Гейланд 185, 194
Гельмгольц 129, 142
Генкль 77
Геринг 15, 27
Гергес 89, 185
Гиббс 43
Глухов Н.Г. 55
Голяр 43
Гопкинсон Дж. 18, 20, 21, 26, 213, 273, 275, 276, 302
Гопкинсон Эд. 20, 21, 26, 213, 302
Гордон 54
Госпиталье 167, 264
Грамм 52, 54, 55, 83, 99, 315
Гретц 194
Губер 51, 133, 135, 143, 146
Гуммель 21, 240, 241

Д

Даниэльсон 194
Д'Арсонваль 21
Депре 17, 21, 27, 36–39, 60, 70, 82, 117, 131, 132, 135, 167
Дери 18, 43
Деттмар 271, 276
Дженни 207
Доливо-Добровольский И. Ф. 8
Дэви 16
Дюбуа-Реймон 120

Е

Евреинова (Доливо-Добровольская) О.М. 11

З

Зайднер 196
Зарферт 282
Зоннеман 129

К

Капп 20, 21, 118–120, 125, 167, 213, 223, 268–271
Кардью 24, 137, 245
Келли 192, 256
Кеннели 194
Кёрпер 55, 198
Киттлер 14, 15, 23, 24, 27, 129, 161, 177, 241

Классон Р. Э. 142, 161

Клименко А. 188

Кольбен 174

Кольрауш 119

Кон 227, 228, 233, 234

Корда 50

Л

Ламейер 30, 66, 112, 132

Лачинов Д. А. 117

Леблан 50, 52, 81, 185, 194

Ленин В. И. 30

Леонард 270

Линдлей 129, 161

Лобах 161

Лотц 259

Лэмм 76, 276

М

Майхе 194

Максвелл 214

Мартин 67

Мейер 253

Миллер 29, 129–133, 135, 141, 144, 168, 286

Миткевич В. Ф. 215, 217

Михайлов-Микулинский М. С. 9

Мордей 26, 188, 211, 212, 214, 215

Мэй 137, 286

Н

Найт 187

Нил 267

О

Осанна 276

П

Паттен 198

Пачинноти 99

Петров В. В. 16, 315

Петров Н. П. 290, 291

Полешко А. И. 55

Попов А. С. 11, 305

Р

Ратенау 29, 133, 138, 147

Рау 157

Рёсслер 124, 210

Ротерт 276

Рюденберг 282

С

Сименс В. 21, 101, 273, 275

Скотт Г. Дж. 207

Скотт Ч. 75, 76, 79

Слаби 305

Слепаян 227, 230, 234, 239

Сольман 192

Стенли 192, 256

Суинбёрн 162, 213, 214

Сушкин Н. И. 305

Сьюмпнер 259

Т

Таак-Тракранен Н. ван 296

Таак-Тракранен Х. ван 296

Тесла 11, 32, 40, 41, 48, 57, 63, 66–77, 79, 81, 84, 87, 90–92, 94,
100, 107, 113, 181, 185, 198, 310, 313

Томпсон 54, 55, 167, 214

Томсон И. 39, 52, 65, 72, 235

Тумба К. 296

Тюри 17, 194

У

Угримов Б. И. 26, 192, 306

Ульбрих 227, 228, 233, 234

Уппенборн 129, 286

Ф

Фарадей 16, 34, 214, 287, 315

Ферранти 20, 235

Феррарис 40–49, 52, 63, 66, 69, 70, 81–85, 87, 88, 90,
119, 125, 129, 167, 253, 259, 286, 303, 313

Фёппл 10, 198, 286

Флейшманн 215

Флоренсов В. Я. 309

Фонтен 17

Форбс 77

Х

Хазельвандер 60–67, 70, 79, 81, 84, 92, 132, 198, 313

Хальдер 161

Ц

Циперновский 18

Ш

Шалленбергер 39, 49, 50, 81

Шателен М. А. 8, 293–295

Шенфер К. И. 178, 215

Шнеллер 134, 135

Штейнметц 21, 72, 125, 135, 185, 194, 209, 210, 223, 245

Штреккер 26, 27

Шуккерт 64, 131

Э

Эберт 138

Эдисон 11, 17, 19, 29, 68, 69, 78, 79, 81, 117, 131, 245, 300, 315

Эйкмейер 245

Эпштейн 247, 297

Эрстед 16

Ю

Юинг 21, 220, 245, 247

Ютен 50, 52, 81, 185

Я

Яблочков П.Н. 11, 16, 17, 27, 54, 55, 83, 187, 188, 290, 315

Якоби Б.С. 16, 118, 315

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Глава I. Юные годы	10
Глава II. Предыстория многофазных систем	32
Глава III. Трехфазная система токов	82
Глава IV. Электропередача Лауфен – Франкфурт	128
Глава V. Электрические машины и трансформаторы	170
Глава VI. Электрические выключатели и электроизмерительные приборы	224
Глава VII. Прочие работы М.О.Доливо-Добровольского. Последний прогноз	266
Глава VIII. Личность М.О.Доливо-Добровольского. Его общественно-научная и производственно-техническая деятельность	284
Глава IX. Место М.О.Доливо-Добровольского в истории электротехники	307
Приложения	316
I. Библиография	316
II. Привилегии и патенты М.О.Доливо-Добровольского	332
III. Именной указатель	339

Переиздание оригинальной книги осуществлено
при поддержке компании «Таврида Электрик»

Веселовский, О.Н.

В38 Михаил Осипович Доливо-Добровольский / О.Н. Веселовский. — Москва, 2021. — 348 с. : ил.

Книга представляет собой исследование жизни и трудов одного из крупнейших деятелей мировой электротехники — Михаила Осиповича Доливо-Добровольского.

Приводится краткий анализ путей развития электротехники в 80-х годах XIX века и показывается историческая закономерность возникновения техники трехфазного тока. Основное внимание уделено ранним этапам развития техники трехфазного тока и других областей электротехники, которые развивались при непосредственном участии М.О. Доливо-Добровольского. Выясняется место М.О. Доливо-Добровольского в истории электротехники.

Книга может представить интерес для широких слоев инженерно-технических и научных работников, интересующихся историей науки и техники, а также для студентов энергетических и электротехнических высших учебных заведений и факультетов.

УДК 001.92
ББК 72.6

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет за собой уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Издание для досуга

О.Н. Веселовский
МИХАИЛ ОСИПОВИЧ ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Подписано в печать 02.08.2021 г.
Формат 70х90/16. Усл. печ. л. 25,5.
Гарнитура «PT Sans».
Тираж 500 экз.

Отпечатано в ООО «Радугапринт».
Тел.: (495) 252-7510.
<http://www.raduga-print.ru>

12+