

Drehstrom – вращающийся ток

Дмитрий Бородин
Виктор Бородин

«Электродвигатели переменного тока не только возможны, но, наоборот, именно там, где нужны электродвигатели, будет применяться предпочтительно переменный ток»

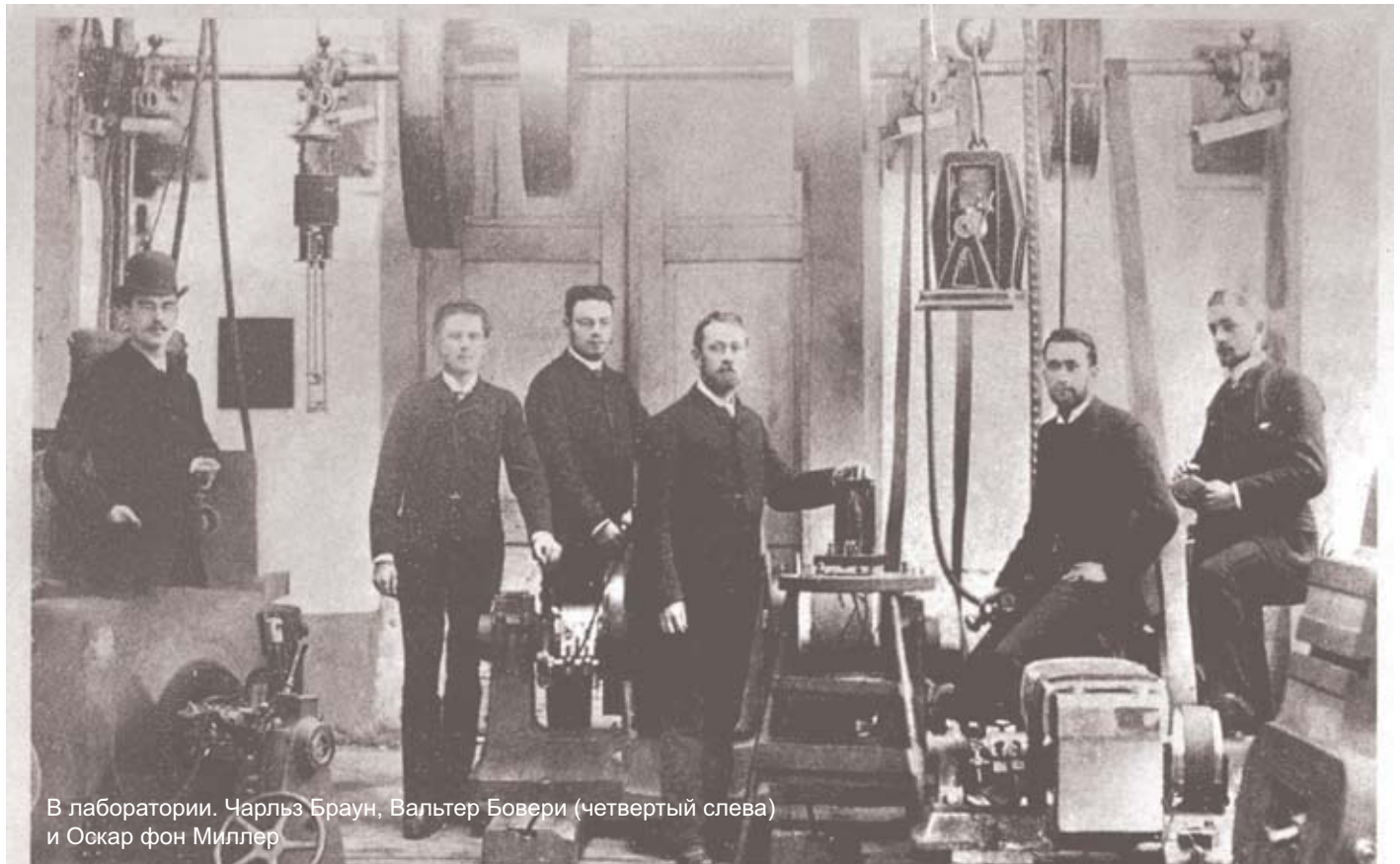
М. О. Доливо-Добровольский



М. О. Доливо-Добровольский

Последние десятилетия девятнадцатого века были наполнены не только бурными событиями в науке и технике. Технический прогресс ускорил и политические процессы в обществе. Убийство Русского царя Александра II Народовольцами в 1881 году вызвало волну репрессий по всей Империи. Эти драматические события не обошли стороной и юного студента Рижского политехнического института – Михаила Доливо-Добровольского. Михаил, за участие в студенческой забастовке солидарности с рабочими рижских заводов был исключен из ВУЗа с запретом поступления в любое учебное заведение России. Это был серьезный удар судьбы. Но, как ни странно, именно этот факт круто изменил как судьбу Михаила, так и историю мировой электротехники... Его дядя выпросил ему разрешение выехать учиться за границу. Он же дал небольшую сумму денег. Доливо-Добровольский поступает в Высшее Техническое Училище в Дармштадте (Германия) на машиностроительный факультет. Это был на редкость удачный выбор. В то время в училище преподавал профессор Эрасмус Киттлер, который впервые в истории начал читать курс электротехники. Михаил стал любимым учеником Киттлера. В 1884 г. Доливо-Добровольский с блеском окончил училище и был оставлен при нем ассистентом.

Посмотрим на фотографию Доливо-Добровольского того времени. Мы ви-



В лаборатории. Чарльз Браун, Вальтер Бовери (четвертый слева) и Оскар фон Миллер

дим молодого человека, только закончившего обучение. Наивные широко открытые для познания глаза мечтателя, неуверенная улыбка, нескладно сидящий старенький костюм... Пройдет неполных восемь лет и этот человек встанет в первый ряд ученых мира.

За несколько лет работы Михаил написал множество статей, запатентовал два крупных изобретения в области электрохимии. Но его деятельность в ВУЗе продолжалась недолго. В 1887 году Доливо-Добровольского пригласил к себе на работу сам Эмиль Ротенау, возглавлявший только что откупившуюся от эдисоновской компании и ставшую самостоятельной «Всеобщую компанию электричества», AEG. Это было, безусловно, счастливое событие. С этого момента началась инженерная и конструкторская деятельность Михаила Осиповича. В его распоряжении оказались весьма большие производственные и человеческие ресурсы. Круг коллег включал таких знаменитых инженеров, как Оскар фон Миллер и Марсель Дебре. Лучших условий для работы и творчества пожелать было нельзя. Первые труды М. О. Доливо-Добровольского относились к системам постоянного тока. Он активно работал в этом направлении, чтобы обеспечить AEG лидирующие позиции на рынке электротехники.

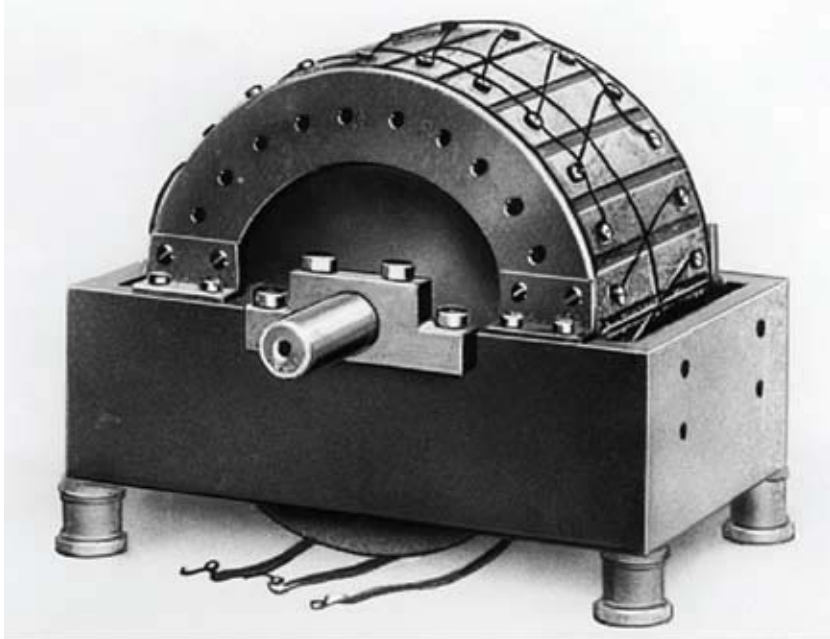
Занимаясь решением практических задач, Михаил Осипович не отставал от последних течений и событий теоретической мысли. Он знакомится с только

что опубликованной в марте 1888 года работой профессора Галилео Феррариса о вращающемся магнитном поле. В этих работах итальянский электротехник рассматривал работу асинхронного двухфазного двигателя переменного тока и наблюдал при этом явление вращающегося магнитного поля. Сдвиг между фазами был 90° , ротор представлял собой медный цилиндр. Феррарис утверждал, что коэффициент полезного действия не будет превышать 50%, и поэтому, многофазные электрические машины переменного тока не могут получить широкого практического применения. Эти статьи дали толчок мысли русского инженера, которого он искал уже несколько лет. Глубокое изучение машин постоянного тока, предпринятое им для абсолютно других задач привело его к выводу об ошибочности теории Феррариса.

Доливо-Добровольский с энтузиазмом принялся за работу. Он принял совершенно правильное решение об использовании не двухфазного тока, как у Феррариса и Теслы, а трехфазного, то есть трех переменных токов, сдвинутых по фазе на одну треть периода (на 120°), создающих вращающееся магнитное поле. Михаил Осипович открыл потрясающее качество трехфазной системы: сумма трех токов в такой цепи в любой момент времени равна нулю. Таким образом эту систему токов можно передавать всего по трем проводам. Доливо-Добровольский доказал, что при передаче тока в трехфазной

системе на три провода идет меньше меди, чем в однофазной и двухфазной системах. Михаил Осипович даже предложил новый термин, характеризующий систему трех переменных токов геометрическая сумма которых в любой момент времени равна нулю – «DREHSTROM» (вращающийся ток). Этот термин по сей день используется в Немецкой литературе. Таким образом Доливо-Добровольскому удалось найти наиболее оптимальную, выигрышную конфигурацию многофазной системы, по которой теперь работает весь мир. После ряда изысканий в 1888 г. он построил первый трёхфазный генератор переменного тока мощностью около 3 киловатт.

Михаил Осипович приступает к разработке самого двигателя. Создавая электродвигатель, Доливо-Добровольский использовал преимущества увеличения числа фаз с двух до трех. Это позволило ему получить значительно лучшее распределение магнитного поля в асинхронном двигателе. Другой его удачей стало изобретение ротора асинхронного двигателя с беличьей клеткой. Это было блестящим решением проблемы, так и не решенной Феррарисом. Доливо-Добровольский сконструировал ротор в виде стального цилиндра, а в проделанные аксиально отверстия заложил медные стержни, соединенные между собой на лобовых частях ротора. Таким образом удалось получить ротор двигателя, который одновременно об-



Первый асинхронный двигатель

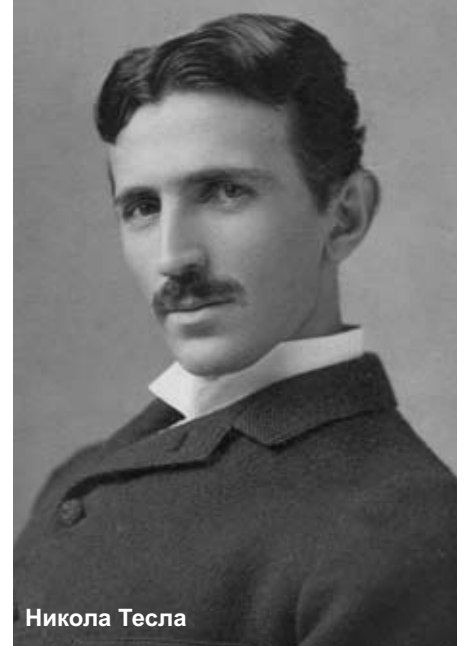
ладал малыми электрическим и магнитным сопротивлением.

Ниже на рисунке мы видим чертежи из первого патента Доливо-Добровольского (заявка 8 марта 1889 г). Такая конструкция ротора сохранилась до наших дней.

К этому моменту уже были известны двухфазные двигатели Теслы, которые как показало время, имели серьезные недостатки в конструкции, что сказывалось на их электромеханических показателях. Основной недостаток вытекал именно из-за неравномерного распределения магнитного поля в двигателе. Кроме того двухфазная система требовала четырех проводов, что делало строительство линии электропередач более дорогим. Тесла, правда, придумал, как четыре провода двухфаз-

ной линии передачи заменить тремя: объединив два из них в один – нулевой. Но по этому проводу шел весьма значительный ток, и, этот третий провод приходилось делать существенно толще. Экономия в меди оказывалась несущественной.

Весной 1889 г. был изготовлен первый трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью около 100 Вт. Доливо-Добровольский отказывается от выполнения электродвигателя с выступающими полюсами как Тесла и Феррарис. Обмотка статора становится распределенной по всей его окружности, что благоприятно сказывается на магнитном рассеянии. Обратимся к описанию первого пуска этого двигателя самим Михаилом Осиповичем: «Уже при первом включении выявилось



Никола Тесла

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».

Необходимо заметить, что далеко не все воспринимали тогда эту работу как успешную. Например, вот что пишет об этом времени Доливо-Добровольский: «Многие крупные деятели электротехники были приглашены ознакомиться в нашей лаборатории с новым электродвигателем. Между прочим я показывал его Вильгельму Сименсу (младший брат Вернера Сименса), который тогда все еще ждал многого от пятипроводной системы постоянного тока (это изобретение прошло незамеченным для семьи Сименс). В сентябре 1889 г. Эдисон посетил Берлин. Когда ему предложили осмотреть новый электродвигатель переменного тока он буквально замахал руками: «Нет, нет, переменный ток это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем. И он не пришел!»

Кстати, в то время, да и в последующее десятилетие, далеко не все видели в трехфазной системе универсальное средство от всех проблем электропередачи на большие расстояния. Для до-

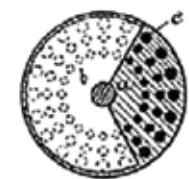


FIG. 1.

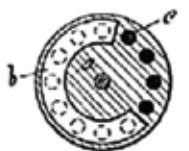


FIG. 2.

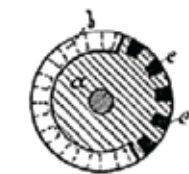
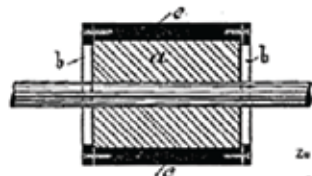
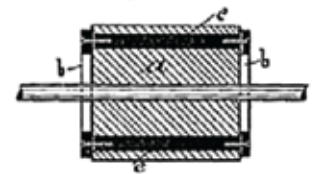
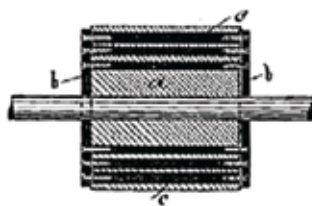


FIG. 3.



Ze der Patentschrift
№ 51083.

стижения в линии высокого напряжения нужны были трансформаторы. А трехфазная система требовала сразу трех однофазных трансформаторов вместо одного при однофазной системе электропитания или двух – при двухфазной. Трансформаторы стоили весьма дорого. Таким образом нужно было считать, что дешевле: три провода трехфазной системы плюс дополнительный трансформатор или три провода двухфазной системы с двумя трансформаторами, при наличии общего нулевого провода. 1889 году Доливо-Добровольский изобретает компактный трехфазный трансформатор. Конструкция его все время совершенствовалась, приобретая шаг от шага современные черты - три стержня, расположенных в одной плоскости (Патент DRP № 79608 от 4 октября 1891 г). В 1890 году он создает специально для осветительной нагрузки трехфазную четырехпроводную схему или трехфазную систему с нулевым проводом. Таким образом становилось все яснее, что трехфазное электроснабжение является более удобным, экономичным и универсальным способом передачи и потребления электроэнергии по сравнению с постоянным, однофазным и двухфазным токами.

В сжатые сроки проводятся многочисленные удачные и неудачные эксперименты по совершенствованию нового асинхронного двигателя. Изготавливаются несколько моделей большей мощности. Появляются новые конструкции. Например, именно тогда рождается асинхронный двигатель с фазным ротором (с контактными кольцами), который применяется и по сей день в условиях тяжелых пусков и регулирования скорости, например в дробилках и мельницах. Но двигатель с кольцами на роторе «вызвал у многих (в том числе и у AEG) некоторое чувство неуверенности». При всех достоинствах такого двигателя «его хотели иметь еще вдобавок и без щеток». В это время двигатель был протестирован руководителем Швейцарского машиностроительных заводов Эрликон – Петру Эмилю Губеру и Чарльзу Брауну. Эрликон имел ряд успешных проектов в области электротехники и, главное, в осуществлении передачи высоких напряжений переменного тока. Директору AEG - Эмилю Ротену этот опыт был чрезвычайно необходим для развития новой электропередачи.

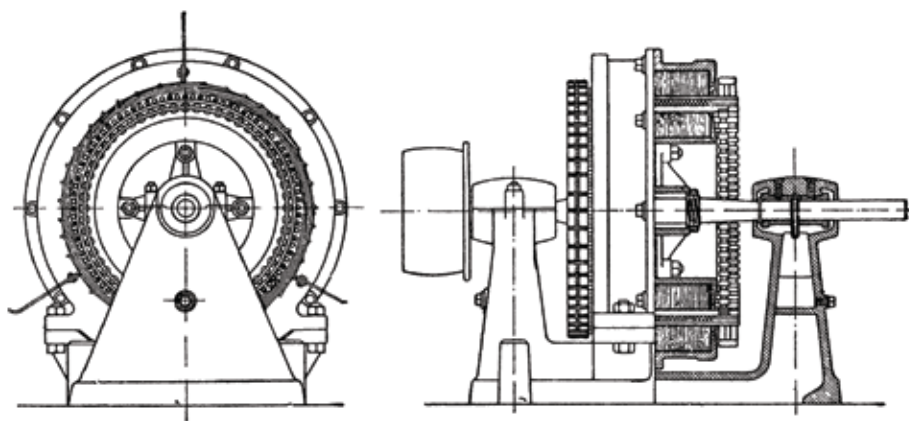
Между AEG и Эрликоном был заключен лицензионный договор. Обе фирмы должны были вести впредь свои исследования совместно и держать друг друга в известности о происходящем. Часть расходов по исследованиям в области трехфазных токов взял на себя Эрликон. С этого момента Доливо-Добровольский должен был «информировать немедленно и подробно техни-

ческого руководителя заводов Эрликон Брауна как об уже выполненной работе, так и о намеченной». Михаил Осипович вспоминал: «Эта информация началась с многочасовых дискуссий и затем перешла в подробную, очень откровенную, почти частную переписку... Различные варианты конструкций и проблема расчета размеров были постоянной темой при встречах Брауна со мной».

Чарльз Браун несмотря на свой возраст - 27 лет (он был на год моложе Доливо-Добровольского) был уже опытным и знаменитым конструктором и инженером. Он работал техническим руководителем в Эрликон четыре года, создав многочисленные конструкции машин постоянного и однофазного переменного тока. Его «динамомашину» получила главный приз на выставке в Париже в

диагональными стержнями; эта идея ... мне чрезвычайно понравилась, так как это облегчало мне применение очень высоких напряжений. Я, в свою очередь, обратил внимание Брауна на то, что при проектировании моторов трехфазного тока следует стремиться главным образом к обеспечению возможно меньшего рассеяния силовых линий. Я доказал ему, что это рассеяние можно уменьшить, если строить электродвигатели с большим числом силовых линий, но с малым числом ампер-витков, правда, при этом увеличивается ток холостого хода или ток намагничивания, если не обеспечить одновременно возможно большее уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора».

Приведем также отзыв о Чарльзе Брауне Академика РАН Шенфера К. И., одно-



Асинхронный двигатель завода Эрликон мощностью 20 л.с.

1889 году. Техническая пресса характеризовала Брауна как «одного из самых ярких и самых известных из континентальных электриков».

Тесные взаимоотношения между AEG и Эрликоном привели к тому, что фирма Эрликон также сконструировала и построила несколько вариантов электродвигателей трехфазного тока мощностью 1—2 л.с. и продемонстрировала их Доливо-Добровольскому. Конструктором был в данном случае - Браун. Таким образом Чарльз Браун стал вторым в истории электромеханики проектировщиком трехфазного асинхронного двигателя. Он сделал существенное улучшение конструкции статора: поместил обмотку в закрытые пазы. Эта идея Чарльза Брауна очень понравилась Михаилу Осиповичу и он использовал ее в своих последующих двигателях с одним важным изменением – пазы выполнялись с очень узкими прорезями (полузакрытые пазы со всыпной обмоткой, применяемые и в настоящее время).

Доливо-Добровольский вспоминал об их совместной работе на страницах журнала «Электричество» в 1900 году: «Во время одного из моих посещений Браун показал мне проект масляного трансформатора трехфазного тока с ра-

го из создателей отечественной школы электромеханики, первого заведующего кафедры электрических машин МЭИ, который он приводит в своем фундаментальном труде «Асинхронные машины» в 1938 году: «Одним из первых, придавших асинхронному двигателю весьма конструктивную форму является Браун, который на заводе Эрликон в Швейцарии 1890 году построил двигатель мощностью 20 л.с.».

Так, тесная, совместная работа двух выдающихся инженеров обогащала их обоих и способствовала быстрому и плодотворному развитию нового направления в электротехнике. За три неполных года были созданы все основные элементы трехфазной электропередачи: генератор, трансформатор, автотрансформатор, трехпроводная и четырехпроводная линии электропередачи, асинхронный двигатель в двух его основных видах (с короткозамкнутым и фазным ротором). Оставалось дело за малым – убедить мировую техническую общественность в преимуществе этой новой системы электропередачи. И такой случай представлялся неожиданно быстро...

Продолжение читайте в следующем номере.