

Михаил Осипович Доливо-Добровольский

(К 150-летию со дня рождения)

Выдающийся русский электротехник, создатель техники трехфазного переменного тока, конструктор электрических машин и аппаратов Михаил Осипович Доливо-Добровольский родился 2 января 1862 г. (21 декабря 1861 г. по ст. ст.) в Гатчине Санкт-Петербургской губернии (ныне Ленинградская область) первенцем в многодетной семье (после него родилось еще семеро детей) мелкого чиновника. Отца, имевшего дворянское происхождение, в 1972 г. перевели в Одессу, где он издавал местную газету. Здесь юноша в 1878 г. окон-



чил реальное училище, которое в сравнении с гуманитарно-классическим направлением гимназии давало среднее образование с большим объемом знаний по математике, физике и биологии. Учебный план включал также химию и черчение, а вместо древних языков изучались немецкий и французский. Он увлекся химией и поступил на химический факультет Рижского политехнического института. После убийства царя Александра II в 1881 г. его за участие в студенческих волнениях исключили из института с запретом обучения в России. Для продолжения образования Доливо-Добровольский переехал в Германию и в Дармштадте поступил на электротехническое отделение машиностроительного факультета Высшего технического училища, где большое внимание уделялось практическим применениям электричества. Здесь будущий ученый в совершенстве изучил вопросы генерирования и применения постоянного тока.

В январе 1882 г. VI (электротехнический) отдел Русского технического общества в Санкт-Петербурге организовал Вторую электрическую выставку. В числе экспонатов отдела слабых токов был аппарат, изобретенный Доливо-Добровольским, — «кнопка-элемент» для электрических звонков. Это было его первое изобретение. Студенческие научные работы юноши относятся к области электрохимии, их результаты опубликованы в статьях «О соотношении различных величин при зарядении вторичных элементов» («Электричество», 1884, № 8) и «Заметки по теории и практике электролиза» («Электричество», 1885, № 5–6). На последнем курсе студент сделал довольно существенное изобретение: предложил пусковую схему для шунтовых дви-

гателей постоянного тока, что оказало непосредственное влияние на развитие электрического привода постоянного тока.

В 1884 г. Доливо-Добровольский с отличием окончил училище и был оставлен при нем ассистентом для преподавания нового самостоятельного курса по практическому применению электрохимии. В 1887 г. он перешел на электротехнический завод фирмы «Машинен-фабрик Эрликон» в Швейцарии, а затем работал конструктором на заводах электротехнической компании Т.А. Эдисона в Германии (впоследствии фирма «Всеобщая компания электричества» (AEG)). Первые его конструкторские работы были связаны с усовершенствованием машин постоянного тока. Предложенная им конструктивная форма и схема четырехполюсных электродвигателей постоянного тока с дополнительными полюсами сохранились до настоящего времени. В 1887–1888 гг. он разработал электромагнитные амперметры и вольтметры, которые выпускались фирмой AEG и применялись для измерения постоянных и переменных токов и напряжений.

В 1885–1888 гг. итальянский физик и электротехник Г. Феррарис предложил применять систему двух переменных токов с одинаковыми амплитудами, сдвинутых по фазе на 90° и названную впоследствии двухфазным током. Предложенные им асинхронные маломощные двухфазные асинхронные электродвигатели с полым ротором в виде медного стакана получили позднее название двигателей Феррариса, в настоящее время они используются в демонстрационных целях.

С трехфазными системами при сдвиге фаз на 60° работал в США серб Н.Тесла, но считал их нежизнеспособными, так как к каждому потребителю нужно было тянуть по шесть проводов, двухфазная же система как минимальный вариант многофазной наиболее экономична. В отличие от Феррариса Тесла полагал, что многофазные токи следует получать от многофазных источников, а не пользоваться фазосмещающими устройствами. В его двухфазном генераторе между полюсами вращались две взаимно перпендикулярные катушки, в которых генерировались два тока, сдвинутые по фазе на 90° . Концы каждой катушки были выведены на кольца, расположенные на валу генератора. Тесла построил

синхронный генератор с тремя независимыми катушками, расположенными под углом 60° друг к другу. Генератор создавал трехфазную систему ЭДС со сдвигом начальных фаз их синусоид на 60° . Ротор двухфазного двигателя Tesla имел обмотку в виде двух расположенных под прямым углом друг к другу замкнутых накоротко катушек со сравнительно большим сопротивлением. В трехфазном электродвигателе Tesla статор имел шесть полюсов, снабженных катушками. Диаметрально расположенные, они были включены шестью проводами в одну из трех фаз генератора переменного трехфазного тока. Ротором служил железный цилиндр, на котором были уложены три замкнутых накоротко катушки, расположенные под углом 60° относительно друг друга. Основным недостатком двигателей Tesla было наличие выступающих полюсов с сосредоточенной обмоткой статора. Большое магнитное сопротивление и неблагоприятное распределение МДС вдоль воздушного зазора ухудшало характеристики машины.

Конструкция обмоток ротора тоже оказалась неудачной. Выполнение их сосредоточенными удлиненной формы (вместо цилиндрической) при выступающих полюсах на статоре отрицательно влияло на пусковые условия двигателя: пусковой момент зависел от начального положения ротора. Кроме того, из-за сравнительно большого сопротивления обмоток ротора ухудшались рабочие характеристики двигателя. В целях экономии металла Tesla предлагал в двухфазной и трехфазной системах применять вместо четырех и шести три провода, сделав один провод общим. Однако расход металла при этом снижался меньше, чем можно было ожидать, так как сечение общего провода должно было быть в 1,41 и 2 раза больше сечения каждого фазного провода. По этим причинам предложенные Теслой двух- и трехфазные асинхронные электродвигатели не нашли применения даже после того, как он впоследствии применил распределенную обмотку, позаимствовав ее конструкцию у Доливо-Добровольского.

Осенью 1888 г. Доливо-Добровольский в английском журнале прочел статью Феррариса «Электродинамическое вращение, произведенное с помощью переменных токов». Он был удивлен ошибочным выводом Феррариса о практической непригодности индукционного электродвигателя, так как в опыте динамического торможения при замыкании накоротко обмотки якоря двигателя постоянного тока возникал большой тормозной момент. По его предположению, если во вращающееся магнитное поле поместить короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то он будет вращаться с ничтожным скольжением и КПД электродвигателей,

основанных на принципе вращающегося магнитного поля, может быть значительно выше 50%. Следовательно, многофазные электрические машины переменного тока могут иметь большое значение для практики. В 1888 г. Доливо-Добровольский, исследуя различные схемы соединения обмоток, сделал ответвления от трех равноотстоящих точек якоря генератора постоянного тока и получил токи с разностью фаз 120° . Таким образом он нашел связанную трехфазную систему переменного тока, т.е. систему из трех переменных токов, сдвинутых по фазе на 120° . В каждый момент времени сумма ЭДС, индуктируемых в трех фазах обмотки генератора, равнялась нулю. Сумма токов, протекающих по проводам к потребителям, также в любой момент времени была равна нулю, а передавать электроэнергию в этой системе можно по трем проводам, а не по шести как в несвязанной трехфазной системе или по четырем как в двухфазной, а также в трехфазной системе Tesla со сдвигом фаз на 60° . В симметричной связанной трехпроводной трехфазной системе потребуется на 25% меньше меди, чем на два провода в однофазной системе.

Теоретически и опытным путем Доливо-Добровольский доказал возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля с помощью трех одинаковых по амплитуде переменных токов, смещенных по времени на одну треть периода и протекающих по трем обмоткам, размещенным по окружности и сдвинутым на пространственные углы 120° относительно друг друга. В 1888 г. им был спроектирован, а в начале 1889 г. фирмой AEG построен первый трехфазный генератор переменного тока мощностью 3 л.с. (2,2 кВт). По конструкции он не отличался от генераторов однофазного переменного тока с вращающимися электромагнитами и только на статоре имел не одну, а разделенную на три части (углы между их осями были равны 120°) обмотку. При вращении ротора в ней индуктировались три одинаковые по амплитуде и частоте ЭДС, но со сдвигом во времени на $1/3$ периода. Эта конструкция электрической машины была положена в основу трехфазных синхронных генераторов и в принципе сохранилась до настоящего времени. Свойство уравновешенности симметричной трехфазной системы — одно из важнейших, так как в неуравновешенной системе возникает неравномерная механическая нагрузка на генераторную установку, что значительно снижает срок ее службы.

Промышленные синхронные генераторы трехфазного переменного тока стали изготавливать с 1891 г. Они обладают высокими эксплуатационными свойствами, поэтому их применяют как устройства, вырабатывающие электрическую энергию на

электростанциях любого вида и масштаба, на современных мобильных транспортных средствах и др. Номинальные единичные мощности современных турбогенераторов достигают 1600 МВт, гидрогенераторов – 1000 МВА.

Затем ученый создал трехфазный электродвигатель со статором в виде кольца Грамма, питаемого в трех точках, и ротором в виде сплошного медного цилиндра. Но КПД этого двигателя был низок: медь оказывалась плохим проводником для магнитного потока, создаваемого током, протекающим по обмоткам статора. При применении стального цилиндра магнитный поток резко возрастал, но из-за худшей электрической проводимости уменьшались ток ротора и вращающий момент. Ученый разрешил это противоречие. Он изготовил ротор из литого железа (хорошая магнитная проводимость) с насаженным полым медным цилиндром (хорошая электрическая проводимость), а вскоре значительно улучшил конструкцию: в просверленные по периферии ротора отверстия были вставлены медные неизолированные стержни, соединенные между собой электрически на лобовых частях ротора медными кольцами. Так возникла конструкция, известная как «беличья клетка».

8 марта 1889 г. он сделал патентную заявку (от имени фирмы АЕГ) на трехфазную систему. Эксперты патентного ведомства требовали бесконечных уточнений. Пока тянулись переговоры по заявке, в июне 1889 г. была запатентована трехфазная система немецкого инженера Ф. Хазельвандера (его патент позднее был аннулирован на основе патентов Теслы). Доливо-Добровольскому в Германии был выдан частичный патент от 31.08 1889 г. на «Якорь двигателя переменного тока» с описанием в нем различных конструкций короткозамкнутых роторов типа «беличья клетка».

Весной 1889 г. фирмой АЕГ был построен первый трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором мощностью около 100 Вт. В качестве статора был использован кольцевой якорь машины постоянного тока. Воздушный зазор составлял около 1 мм, что в то время считалось необычным, так как в машинах постоянного тока он был значительно больше. Вращающий момент при пуске был заметно больше, чем при двух фазах. При нагрузке 0,1–0,125 л.с. (73,6–92 Вт) было получено значение КПД около 80%. Электродвигатели постоянного тока имели КПД на 10% меньше. Важнейшим достижением ученого явилось то, что он кольцевую обмотку статора заменил барабанной и отказался от выполнения двигателя с выступающими полюсами. Сделал обмотку разрезной со встречным соединением противоположных катушек и распределенной по всей окру-

ности в полузакрытых пазах статора. Благодаря этому значительно уменьшилось магнитное рассеяние по сравнению с двигателями Тесла. В конце 90-х годов 19 в. асинхронные электродвигатели уже выпускались в значительном количестве и в большом диапазоне мощностей. Их характеристики были вполне удовлетворительными, например, трехфазные асинхронные электродвигатели фирмы АЕГ мощностью 5 л.с. (3,68 кВт) имели КПД 85%, а коэффициент мощности выше 0,9.

Созданный ученым трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором является основным типом двигателей переменного тока современности. Его конструкция благодаря простоте, совершенству, надежности, дешевизне и экономичности при эксплуатации сохранилась в основных чертах до настоящего времени. За 120-летие существования асинхронных электродвигателей в них совершенствовались применяемые электротехнические материалы, конструкция отдельных узлов и деталей, технология изготовления, значительно снижались габаритные размеры и масса, но предложенные Доливо-Добровольским принципиальные конструктивные исполнения в основном остались неизменными. Асинхронные машины могут работать в режимах двигателя, генератора, электромагнитного тормоза, преобразователя частоты и числа фаз, машины двойного питания, индукционного регулятора напряжения и фазорегулятора, электромагнитной муфты и др.

В 1925 г. будущий академик М.П. Костенко в статье «Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов» («Электричество», 1925, № 2) впервые изложил основы теории асинхронного электродвигателя при переменной частоте. Впервые изменение частоты рассматривалось как метод частотного регулирования скорости короткозамкнутых двигателей.

Испытания первого трехфазного асинхронного электродвигателя оказались благоприятными, и Доливо-Добровольский спроектировал двигатель мощностью 5 л.с. (3,68 кВт), который в 1890 г. изготовила немецкая фирма АЕГ. Для уменьшения потерь от вихревых токов ротор был сделан шихтованным из железных листов. Первое же испытание показало значительное ухудшение пусковых свойств: сильный шум, большой бросок тока. Во время работы электродвигатель потреблял небольшой ток и шум исчезал. При перегрузке на 50% он останавливался и начинал гудеть. Доливо-Добровольский такое явление объяснил тем, что по сравнению с предыдущим двигателем ротор был слишком сильно замкнут накоротко. Установить это он сумел, удалив из ротора часть медных стержней. При увеличении сопротивления обмотки ротора

пусковые условия улучшались (не было избыточно-го пускового тока, шума и вибрации соединительных проводов), но рабочие характеристики двигателя ухудшались.

Анализ возникших затруднений привел к созданию фазного ротора с изолированной обмоткой, соединенной в звезду с выведенными концами к трем кольцам, которые были установлены изолированно на вал. С помощью щеток эти кольца были соединены с переменными сопротивлениями (пусковым реостатом). В момент пуска включали в цепь ротора большое сопротивление. Пусковой ток уменьшался, а пусковой вращающий момент увеличивался по сравнению с прямым пуском трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. По мере нарастания частоты вращения вала добавочные сопротивления в цепи ротора выводили полностью до короткого замыкания. При этом двигатель начинал вращаться спокойно и плавно. Так был создан Доливо-Добровольским трехфазный асинхронный электродвигатель с контактными кольцами, который был основным типом двигателей в конце 19 и начале 20 вв. У этих электродвигателей с помощью переменных сопротивлений в цепи ротора можно было плавно регулировать частоту вращения вала от номинальной до нуля. Мощные асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются в промышленности до настоящего времени для привода механизмов, требующих плавного регулирования частоты вращения вниз от номинальной, а также механизмов с особо тяжелыми условиями пуска. У этих двигателей имеется возможность увеличивать пусковой вращающий момент до максимального значения (в первый момент времени) с помощью пускового реостата и уменьшать пусковой ток в 2–3 раза.

В начале 1890 г. Доливо-Добровольским был построен асинхронный трехфазный электродвигатель мощностью 2–3 л.с. (1,47–2,21 кВт). Индуктирующая часть, к которой подводился трехфазный ток из сети, была выполнена вращающейся и помещена внутри электродвигателя. К ней ток подводился с помощью трех колец и щеток. Вторичная неподвижная обмотка была выполнена в виде стержней. Испытания этого электродвигателя показали хорошие результаты как в отношении перегрузочной способности, так и коэффициента мощности. Запускать его можно было без включения добавочных сопротивлений.

В 1889–1890 гг. Доливо-Добровольский вместо трех обычных однофазных трансформаторов создал трехфазный. Вначале это был трансформатор с радиальным расположением сердечников. Его конструкция напоминала электрическую машину с выступающими полюсами, в которой устранен воз-

душный зазор, а обмотки ротора перенесены на стержни. Это были два концентрически расположенных кольца с тремя радиально установленными сердечниками, на которых размещались обмотки трансформатора. Затем было предложено несколько конструкций призматических трансформаторов, в которых удалось получить более компактную форму магнитопровода: три вертикальных стержня с обмотками и два одинакового диаметра кольца замыкались по торцам стержнями. В качестве варианта предлагалось заменить кольца звездообразными замыкающими ярмами. Но они имели пространственный магнитопровод, и из-за сложной технологии изготовления призматические трансформаторы не получили применения. В 70-х годах 20 в. было освоено производство рулонной холоднокатаной стали, для обмоток начали использовать алюминиевую фольгу и ленту и стало возможным серийное производство мощных трехфазных трансформаторов с пространственным магнитопроводом.

Изучая распределение магнитных потоков в призматическом трансформаторе с замыкающими кольцами на концах сердечников, Доливо-Добровольский пришел к выводу, что их сумма в любой момент времени равна нулю. Поэтому можно разрезать замыкающие кольца и развернуть трансформатор в одну плоскость. Три стержня будут расположены параллельно в одной плоскости, четвертый не нужен. Осенью 1891 г. ученый подал патентную заявку на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости. Эта конструкция получила широкое распространение из-за меньшей материалоемкости и минимальных отходов электротехнической стали при штамповке отдельных листов и сохранилась по настоящее время. Эксплуатация трехфазных трансформаторов показала высокую степень их надежности.

В этот же период Доливо-Добровольский создал основы теории и проектирования трансформаторов, опровергнув ошибочное утверждение о том, что трансформаторы принципиально не могут быть экономичными аппаратами, и разработал другие элементы трехфазных цепей переменного тока: схемы включения генераторов и двигателей звездой и треугольником (возможность получения в одной сети двух уровней мощности), пусковые реостаты для асинхронных электродвигателей с фазным ротором и четырехпроводную схему трехфазной цепи с нейтральным (нулевым) проводом. Он обосновал, что четырехпроводная трехфазная система располагает двумя рабочими напряжениями (фазным для включения осветительной нагрузки и повышенным линейным – для силовой), допускает несимметрию нагрузки при неизменности фазных напряжений.

Первые системы электроснабжения переменным током рождались в условиях ожесточенной конкурентной борьбы могущественных в финансовом отношении электротехнических фирм и компаний, которые стояли за спиной дискутирующих ученых. Возможность применять высокое напряжение в электрических сетях при сохранении низкого напряжения у генераторов и потребителей, т.е. экономить проводниковый материал, вызвала среди электротехников стремление к применению переменного тока. Этому противодействовали сторонники постоянного тока. На их стороне были хорошо изученное оборудование, измерительные приборы, опыт долголетнего применения и знание законов постоянного тока. У сторонников переменного тока пока еще не было таких веских аргументов. Существовавшие тогда типы электродвигателей переменного тока уступали по своим качествам и удобству эксплуатации двигателям постоянного тока. Целый ряд явлений в цепях переменного тока оставался непонятным. Профессор Московского университета А.Г. Столетов писал («Электричество», 1889, № 13–14): «И в ученых докладах и в газетных статьях система (переменного тока — Н.Г.) обличалась как нечто еретическое, не национальное и, безусловно, гибельное; доказывалось, что трансформаторы начисто запрещены во всех порядочных государствах Запада и терпят разве в какой-нибудь Италии, падкой на дешевизну».

Непримиримым борцом против переменного тока в 80-х годах 19 в. выступал великий американский изобретатель Т.А. Эдисон, владелец электростанций и электроснабжающих установок постоянного тока в городах всего мира, а также крупной электротехнической фирмы. В сентябре 1889 г. он посетил Берли. На сделанное ему Доливо-Добровольским предложение осмотреть свой новый трехфазный электродвигатель переменного тока он замахал руками и сказал: «Нет, нет, переменный ток — это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем». Обычные методы промышленной конкуренции не в силах были препятствовать распространению трехфазной системы переменного тока. Эдисон попытался сознательно затормозить прогресс в этой области электротехники. Сторонникам переменного тока он не разрешал продавать право на использование патентов, зарегистрированных на свое имя. Объявил переменный ток противным человеческой природе, морали, Библии и внес в сенат штата Виргиния законопроект о запрещении в быту и в промышленности переменного тока как необычайно опасного; добивался, чтобы казнь на электрическом стуле проводилась с помощью именно переменного тока. В его лабора-

тории переменным током были умерщвлены 24 собаки, 2 теленка и лошадь. В г. Обертон на северо-востоке США на электрическом стуле с помощью переменного тока был в страшных мучениях казнен У. Кемлер, зарубивший топором любовницу. После первой подачи напряжения он не умер, только после повторного включения более высокого напряжения приговор суда был приведен в исполнение. В Америке возникла массовая истерия против переменного тока. Введение смертной казни осужденных судом на смерть на электрическом стуле с помощью переменного электрического тока высокого напряжения в 1889 г. в США было делом рук крупнейших американских фирм, отстаивающих господство постоянного тока. Генеральная ассамблея штата Виргиния постановила, что с 1 апреля 1890 г. напряжение электрической цепи в местах, к которым публика имеет доступ, не должно превышать для постоянного тока 800 В, для переменного тока 200 В. Закон должен был лишить технику переменного тока его преимущества: возможности трансформирования напряжения и передачи электроэнергии на большие расстояния.

Однако многочисленные попытки (И. Фотен, Ф.А. Пироцкий, Д.А. Лачинов, М. Депре, Р. Тюри и др.) осуществить передачу энергии на постоянном токе высокого напряжения не увенчались успехом. Система имела низкий КПД, обладала рядом существенных недостатков и не получила распространения.

Для доказательства преимуществ трехфазной системы Доливо-Добровольский принял активное участие в проектировании и строительстве для Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне¹ линии электропередачи длиной 120 миль (173,08 км) от гидростанции Лауфенского водопада у цементной фабрики на р. Неккар, где был установлен генератор мощностью 300 л.с. (230 кВА), напряжением 95 В со схемой соединения обмоток в звезду, созданный главным инженером швейцарской фирмы «Машинен-фабрик Эрликон» Ч.Ю.Л. Броуном, который сотрудничал в области конструирования многофазных машин переменного тока с Доливо-Добровольским. За полгода такая линия при поддержке трех правительств германских королевств Вюртемберга, Баварии и Пруссии была построена. На каждом конце линии были включены трехфазные трансформаторы с магнитопроводами призматической формы, погруженными в баки с маслом, мощностью 150 кВА каждый.

¹ Подробнее об этом знаменательном событии мирового масштаба см. в разделе «Из истории электротехники» этого номера на с. 63.

Приборов для измерения напряжения выше 1000 В не было, поэтому напряжение линии определяли умножением низшего напряжения на коэффициент трансформации. Трехпроводная линия была выполнена на деревянных опорах с пролетом 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфоро-масляных изоляторах. В начале линии в разрыв проводов были включены участки длиной 2,5 м, состоявшие из двух медных проволок диаметром 0,15 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте-на-Майне устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость и машинист, заметив это, останавливал ее. Мощность была столь велика, что на выставочной площадке во Франкфурте-на-Майне от понижающего трансформатора питались 1000 ламп накаливания напряжением 65 В, расположенные на огромном рекламном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный электродвигатель Доливо-Добровольского мощностью 75 кВт, изготовленный для выставки и приводивший в действие гидравлический насос мощностью 100 л.с. (73,6 кВт) декоративного водопада. Двигатель показал хорошие эксплуатационные свойства (надежность и высокий КПД), был выполнен обращенным, т.е. с питанием со стороны ротора через контактные кольца, установленные изолированно на валу. Так как не было точно известно, при каком напряжении (100 или 170 В) двигатель будет работать, на его валу установили шесть контактных колец. Это давало возможность переключения его обмотки со звезды на треугольник.

Одновременно Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный электродвигатель мощностью 100 Вт с вентилятором на валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с установленным на его валу генератором постоянного тока, питающим лампы накаливания. Испытания электропередачи, которые проводились Международной комиссией под председательством немецкого ученого Г. Гельмгольца в августе и сентябре 1891 г. прошли успешно.

Франкфуртская выставка взволновала инженерное сообщество, в электротехнике наступила эпоха широкого применения переменного трехфазного тока, приведшая к огромным изменениям в мировой экономике.

Темпы внедрения трехфазной системы в США вначале были заметно ниже, чем в Европе. Это объяснялось тем, что американская фирма «Вестингауз Электрик», победившая и разорившая компании постоянного тока, настойчиво пыталась вернуть работы по сооружению электростанции и электрических сетей по двухфазной системе пере-

менного тока Теслы. Американская фирма «Дженерал Электрик», основанная в 1892 г., быстро переориентировалась и развила бурную деятельность по сооружению трехфазных установок. Ныне эта электротехническая монополия в США занимает первое место в мировой электротехнической и электронной промышленности. Судьба систем электропитания постоянным, одно- и двухфазным переменным током была предрешена. С 1901–1905 гг. в основном сооружались трехфазные электростанции. Они становились крупными промышленными предприятиями по выработке электрической энергии, начали создаваться энергетические системы.

В докладе на Международном конгрессе электриков во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. Доливо-Добровольский показал, что магнитный поток катушки, включенной в цепь переменного тока, при неизменных частоте и числе витков определяется напряжением и не зависит от магнитного сопротивления катушки. От магнитного сопротивления зависит значение намагничивающего тока. В настоящее время это положение является исходным в расчетах электромагнитных устройств переменного тока. Кроме того, ученый сообщил, что если магнитный поток изменяется синусоидально, то ЭДС и напряжение также изменяются по этому закону, причем ЭДС и магнитный поток сдвинуты по фазе на 90°. Им были введены понятия активной и реактивной составляющих тока, а метод разложения тока на две составляющие был рекомендован для практических расчетов и анализа процессов в электрических машинах и аппаратах. Доливо-Добровольский обосновал необходимость передачи синусоидального тока как наименее подверженного искажениям. Под его влиянием в Европе была принята частота промышленного тока 50 Гц (в США вначале применяли промышленные частоты 133, 40 Гц, а затем перешли на 60 Гц).

На выставке 1891 г. ученый сделал открытие: обнаружил повышение на 8–9% напряжения на зажимах генератора в Лауфене при включении незамкнутой во Франкфурте-на-Майне линии. Таким была открыта реакция якоря генератора на емкостную нагрузку. По этому поводу он опубликовал статьи «Передача энергии трехфазным током» и «О некоторых особенных явлениях в высоковольтных системах».

Доливо-Добровольский установил, что для трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором можно достичь достаточного вращающего момента при напряжении, составляющем часть номинального, но при увеличенных скольжении и токе. В 1892 г. он построил трехфазный автотрансформатор с переменным коэффициентом трансформации, который при пуске

трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором во много раз уменьшал ток, потребляемый из сети. Метод автотрансформаторного пуска при пониженном напряжении, разработанный Доливо-Добровольским, применяется в настоящее время для мощных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором имели небольшой пусковой вращающий момент и значительный пусковой ток, что являлось существенным недостатком «беличьей клетки». В 1892 г. Доливо-Добровольский предложил трехфазный асинхронный электродвигатель с двухрядной беличьей клеткой, внешние стержни которой имели меньшее сечение, чем внутренние, что облегчало пуск. Он нашел оптимальное решение в соотношении сопротивлений между наружной и внутренней клетками, при котором удалось достичь значительного улучшения пусковых характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при незначительном снижении коэффициента мощности. Для Чикагской выставки, устроенной в честь 400-летия открытия Америки Х. Колумбом, фирма AEG изготовила трехфазный асинхронный электродвигатель с двухрядной беличьей клеткой на роторе мощностью 50 л.с. (36,8 кВт), потреблявший пусковой ток на 40% больше номинального; КПД двигателя составлял 91%.

В 1892 г. Доливо-Добровольский изобрел и изготовил индукционный измерительный механизм, в котором удачно применил мягкое железо и использовал принцип электродвигателя с вращающимся магнитным полем переменного тока и подвижной частью в виде диска. Создал приборы для устранения помех в телефонах от электрических сетей промышленных токов и для измерения потерь от вихревых токов и гистерезиса при перемагничивании листов стали сердечников электрических машин и трансформаторов, что позволило определять искомые потери, проводя измерения лишь в небольшом объеме испытуемого материала с помощью обычных электроизмерительных приборов – ваттметра и амперметра.

Препятствием расширения сетей постоянного тока 110–220 В с лампами накаливания была невозможность применения более высокого напряжения. При напряжении 220 В радиус района сети не мог превышать 1,5 км. При большем радиусе электроснабжающая установка становилась неприемлемой с экономической точки зрения из-за огромных размеров потерь напряжения. Предложенный Доливо-Добровольским экономичный делитель напряжения позволял использовать в линиях электропередачи напряжение, вдвое большее, чем у по-

требителя. Это простое в эксплуатации приспособление широко применялось в установках постоянного тока до тех пор, пока трехфазный ток почти целиком не вытеснил постоянный.

В 1894 г. ученый изобрел фазометр для измерения угла фазного расхождения между векторами тока и напряжения при силовой нагрузке в сети переменного тока. Его ваттметры, фазометры и частотомеры отличались простотой, надежностью и получили в свое время широкое применение в качестве измерительных приборов для распределительных щитов на электрических станциях. И теперь принцип электродвигателя с вращающимся магнитным полем переменного тока используется для устройства электрических измерительных приборов.

В декабре 1899 г. Доливо-Добровольский приехал в Россию для участия в Первом всероссийском электротехническом съезде и получил возможность познакомиться русских электротехников с успехами изобретенной им системы трехфазных токов почти за десятилетний период ее существования. Одновременно он помог своими знаниями и опытом в организации электротехнического отделения (так назывались тогда в технических высших школах факультеты) в Санкт-Петербургском политехническом институте (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) для подготовки инженеров-электриков. Ученый принял деятельное участие в разработке принципов учебного плана и методов преподавания, в организации электротехнических лабораторий и содействовал в получении необходимого оборудования. Санкт-Петербургский электротехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет) присвоил ему звание Почетного инженера-электрика. Он был в числе первых из семнадцати, кому за период с 1899 по 1903 гг. было присвоено это звание (среди них А.Н. Лодыгин, Д.А. Лачинов, Н.Н. Бенардос, А.С. Попов, И.И. Боргман, К.Ф. Сименс).

Несколько лет из-за болезни Доливо-Добровольский не занимался активной научной деятельностью. Но как только наступило улучшение, он вернулся на работу и занял должность технического директора завода фирмы AEG. В 1910–1914 гг. им первым был предложен широко применяющийся в настоящее время метод гашения электрической дуги в выключающих аппаратах с применением искрогасительной решетки.

С началом Первой мировой войны Доливо-Добровольский (сохранивший российское гражданство) был вынужден переехать в Швейцарию. Здесь он занялся расчетами по проблемам передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния и пришел к неожиданным выводам, которые в 1918 г.

им были изложены в докладе (опубликован в 1919 г.) «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния». Переменный ток из-за влияния емкости и самоиндукции воздушной линии электропередачи и резко возрастающих потерь экономически не целесообразно передавать на расстояния свыше 500 км и нужно переходить на воздушные линии постоянного тока; для подземных кабельных сетей границы применимости переменного тока при этом еще более узки. Будущее развитие электроэнергетики ученый видел в дальних электропередачах постоянного тока напряжением в миллионы вольт по подземным кабелям. Как можно будет получать постоянный ток сверхвысоких напряжений он не знал, но был уверен, что такой будет найден. В нашей стране первая мощная линия электропередачи постоянного тока напряжением 800 кВ длиной 473 км Волжская ГЭС–Донбасс была введена в действие в 1966 г. В 80-х годах 20 в. линии электропередачи от электростанций на сверхдальние расстояния (1500 км) были выполнены на постоянном токе напряжением 1500 кВ.

После окончания войны в 1918 г. Доливо-Добровольский вернулся на фирму AEG, но болезнь сердца, преследовавшая его с детских лет, обострилась, и 15 ноября 1919 г. в возрасте 56 лет он скончался. Похоронен в г. Гейдельберге (округ в составе земли Бавария в Германии).

Полученные более 100 лет назад результаты научных работ гениального русского ученого и изобретателя М.О. Доливо-Добровольского имеют выдающееся значение для мировой электроэнергетики, совпали с генеральным направлением ее развития и не потеряли своей актуальности в наши дни.

Более подробно о жизни и научной деятельности Михаила Осиповича Доливо-Добровольского можно прочитать в следующих изданиях: *Веселовский О.Н.* Михаил Осипович Доливо-Добровольский. — М.: ГЭИ, 1958; *Белькинд Л.Д.* М.О. Доливо-Добровольский. К 25-летию со дня смерти. — Электричество, 1945, №3; *Угримов Б.И.* Пятьдесят лет трехфазного тока. — Электричество, 1940, №1; *Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники/Под ред. С.И. Вавилова.* — М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1948; *Кузнецов Б.Г.* Два века русской электротехнической мысли. — Электричество, 1940, №1; *Гусев С.А.* Очерки по истории развития электрических машин. — М.; Л.: ГЭИ, 1955; *Шателен М.А.* Русские электротехники второй половины XIX века. — М.: ГЭИ, 1955; *Веселовский О.Н. и Шнейберг Я.А.* Очерки по истории электротехники. — М.: Изд-во МЭИ, 1993.

Григорьев Н.Д., канд. техн. наук