

«Drehstrom» — вращающийся ток (к 160-летию со дня рождения М.О. Доливо-Добровольского)

БОРОДИН Д.А.

ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром», Москва, Россия

Статья посвящена началу деятельности Михаила Осиповича Доливо-Добровольского. Конец 1880-х гг. характеризуется бурным развитием технологий переменного тока. Работы Г. Феррариса, Ч.Ш. Бредли, Н. Теслы, Й. Венстрёма, Ф.А. Хезельвандера и других электротехников значительно продвинули теорию и практическое использование переменного тока. Тем не менее, уровень проработки новых электрических устройств еще был невысок, что тормозило их широкое применение. За сравнительно короткий промежуток времени (1888–1891 гг.) Доливо-Добровольский создает практически пригодную электрическую систему, основанную на трехфазных токах. Михаил Осипович разрабатывает простой, надежный и обладающий отличными электромеханическими характеристиками трехфазный асинхронный двигатель и вместе с ним всю цепочку трехфазных устройств для выработки, транспортировки и распределения электроэнергии: трехфазные трансформаторы, генераторы, линии электропередачи. Идеи Доливо-Добровольского блестяще воплотились в Лауфен-Франкфуртской электропередаче длиной 170 км, которая стала наглядным примером для электротехников всего мира и толчком для дальнейшего широкого применения трехфазного тока.

Ключевые слова: М.О. Доливо-Добровольский, трехфазный асинхронный двигатель, трехфазная система токов, Лауфен-Франкфуртская электропередача, Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне

Электродвигатели переменного тока не только возможны, но, наоборот, именно там, где нужны электродвигатели, будет применяться преимущественно переменный ток.

М.О. Доливо-Добровольский

Последние десятилетия XIX в. были наполнены бурными событиями не только в науке и технике, технический прогресс ускорил и политические процессы в обществе. Убийство в 1881 г. русского царя Александра II народовольцами вызвало волну репрессий по всей Российской Империи. Эти драматические события не обошли стороной и юного студента Рижского политехника Михаила Доливо-Добровольского. За участие в студенческой забастовке солидарности с рабочими Михаил 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 и небольшую сумму денег. Доливо-Добровольский поступил в Высшее Техническое Училище в Дармштадте (Германия) на машиностроительный факультет. Это был на редкость удачный выбор. В то время в училище преподавал профессор Эразмус 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 (рис. 1). Мы видим 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.



Рис. 1. М.О. Доливо-Добровольский

Fig. 1. M.O. Dolivo-Dobrovolsky

За несколько лет работы Михаил написал множество статей, запатентовал два крупных изобретения в области электрохимии. Но его деятельность в училище продолжалась недолго. В 1887 г. Доливо-Добровольского пригласил к себе на работу сам Эмиль Ратенау, выдающийся немецкий предприниматель и промышленник, один из лидеров европейской электротехнической промышленности. Ратенау приобрел права на патенты Эдисона в Европе и в 1883 г. основал «Германскую эдисоновскую компанию», которая преобразовалась в 1887 г. во всемирно знаменитую компанию «*АЕG*» (*Allgemeine Elektrizitaets-Gesellschaft*). 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. В круг его коллег входили такие знаменитые инженеры, как Оскар фон Миллер и Марсель Депре. Компания «*АЕG*» тесно сотрудничала с крупной швейцарской машиностроительной компанией «*Эрликон*», которую возглавлял давний друг Ратенау по учебе в политехническом институте в Цюрихе Петр Эмиль Губер. Техническим директором «*Эрликона*» был Чарльз Юджин Ланселот Браун – к тому моменту всемирно известный конструктор электрических машин и создатель электропередач. Лучших условий для работы и творчества Доливо-Добровольскому пожелать было нельзя. Первые труды М.О. Доливо-Добровольского относились к системам постоянного тока. Он многое сделал, чтобы обеспечить «*АЕG*» лидирующие позиции на рынке электротехники.

Занимаясь решением практических задач, Михаил Осипович не отставал от последних течений и событий теоретической мысли. В конце 1880-х гг. довольно много талантливых инженеров и ученых занимались многофазными токами. Эта идея буквально носилась в воздухе. Очень коротко расскажем об основных создателях этого нового направления в электротехнике.

Первым, кто понял принцип «вращающегося поля», был Галилео Феррарис, который еще в 1885 г. изготовил несколько небольших макетов двухфазных электродвигателей с вращающимся магнитным полем. Максимальная мощность двигателя составила всего 3 Вт. Феррарис подсчитал КПД нового двигателя. При максимальной мощности он не превосходил 50 %. Такой низкий КПД совпадал с расчетными данными ученого, поэтому своему изобретению он не придал особого значения, не стал получать на него патент и выступил с публичным докладом в Туринской академии наук на эту тему только в 1888 г. Его доклад назывался «Электродинамическое вращение, производимое посредством переменных токов» [1].

Американский ученый Чарльз Шенк Бредли, один из основоположников электролитического производства алюминия, самостоятельно изобрел двухфазную

и трехфазную системы токов. Бредли долгое время занимался разработкой генераторов для этого технологического процесса, так как требовались специальные генераторы с большими значениями тока. Бредли 8 мая 1887 г. получил патент Соединенных Штатов Америки № 390439 на «динамо-электрическую машину», где показал, что обычную машину постоянного тока можно перестроить в двухфазную синхронную машину, если сделать равноудаленные отпайки от граммовской обмотки якоря. С помощью этого устройства можно было создать два переменных тока, смещенных относительно друг друга по фазе на 90° . Следующий патент № 409450, который Бредли заявил в 1888 г. и опубликовал в 1889 г., касался уже трехфазных токов. Отводы от граммовской обмотки якоря располагались на 120° друг от друга. Но трехфазный генератор Бредли не предназначался для питания трехфазных двигателей. Таким образом, Бредли стоял не в шаге от открытия вращающегося поля, он стоял на «самом открытии», но не сумел им воспользоваться [2].

В 1887 г. сербский ученый Никола Тесла, работая в Соединенных Штатах Америки, спроектировал и изготовил несколько моделей асинхронных двигателей в двухфазном (четырёхпроводном) и трехфазном (четырёх- и трёхпроводном) вариантах. В лаборатории Теслы также изготавливались двухфазные и трехфазные генераторы с несопряженными цепями¹, которые имели соответственно четыре и шесть контактных колец. Двухфазный ток Тесла получал с помощью генератора, переделанного из машины постоянного тока. Были проведены испытания двух моделей асинхронных двигателей мощностью 370 и 920 Вт. При испытаниях КПД достигал 50–60 %. К октябрю 1887 г. работа Теслы продвинулась настолько значительно, что он счел необходимым обратиться в Патентное бюро США с заявками. С октября по декабрь 1887 г. Тесла подал заявки на семь патентов. В мае 1888 г. Патентное бюро выдало все патенты разом. 16 мая 1888 г. Тесла выступил в Нью-Йорке в Американском институте инженеров-электриков с докладом «Электродинамическое вращение с помощью переменных токов». Его лекция сопровождалась демонстрацией действующих моделей двухфазных двигателей. Материалы выступления Теслы немедленно опубликовались и быстро стали известными во всем мире. Тесла продолжал активно работать с многофазными двигателями. Он получил более 40 патентов в этом направлении и 1888 г. продал их фирме «Вестингауз», с которой сотрудничал несколько лет. «Вестингауз» мгновенно переключилась на переменный ток. Двигатели поступили в продажу уже в 1889 г. Но в последующем стало понятно, что эти электродвигатели оказались весьма неудачно сконструированы. Тесла «застолбил» в своих патентах всевозможные варианты переменного тока: однофазный, двухфазный, трехфазный, четырехфазный

¹Каждая фаза при несопряженной схеме электрически не соединена с другой и наоборот, при сопряженной системе фазы электрически соединены друг с другом. Такие схемы также называют несвязанными и связанными.

и т.д. Но Тесла считал приоритетней двухфазную схему. Поэтому серьезную техническую проработку прошли двигатели только двухфазной конструкции. И именно они стали изготавливаться для продажи.

Блестящий шведский ученый, один из основателей «ASEA», Йонас Венстрём практически в это же время создал и запатентовал трехфазный асинхронный двигатель и разработал трехфазную цепь, включающую трехфазный генератор и трехфазный трансформатор. Он также применял в своих схемах соединения в «звезду» и «треугольник». В плеяде изобретателей асинхронного двигателя необходимо упомянуть также и немецкого ученого Фридриха Августа Хазельвандера, который в конце 1880-х интенсивно работал над двухфазными и трехфазными системами.

Михаил Осипович Доливо-Добровольский, прочтя только что опубликованную работу профессора Галилео Феррариса (март 1888 г.) о вращающемся магнитном поле, зажегся этой идеей. Глубокое изучение машин постоянного тока, предпринятое им для решения абсолютно других задач, привело к мысли, что выводы Феррариса ошибочны.

Доливо-Добровольский с большим энтузиазмом стал работать над реализацией своей идеи создания практически пригодных многофазных двигателей. Не лишним, правда, будет сказать, что в тот момент руководство «АЕГ» относилось довольно скептически к такому увлечению Михаила Осиповича. Он был сильно загружен текущими проектами и работал над своей новой темой только по ночам, боясь вызвать недовольство начальства. Проведя не одну бессонную ночь над всевозможными вариантами многофазных цепей, Михаил Осипович принял единственно правильное решение – использовать не двухфазный ток, как у Феррариса и Теслы, а трехфазный, т.е. три переменных тока, сдвинутых по фазе на одну треть периода (на 120°) и создающих вращающееся магнитное поле. «Постоянно размышляя над чертежами и схемами обмоток и протеканием токов, я напал на мысль сделать отвлечения от трех равностоящих точек якоря постоянного тока. Так появился трехфазный ток только с тремя проводами. Но получил я здесь разность фаз в 120° вместо 60° . Это потребовало разрешения ряда головоломных вопросов, чтобы такая система оказалась не хуже, чем с двумя токами под 90° Я долго думал о своеобразном наложении трех токов в трех проводах, где нет никакого обратного провода и где, собственно, каждый провод одновременно является обратным для других. Я назвал это сопряжением токов, а все вместе «трижды сопряженным током» [3].

Изобретение Доливо-Добровольского иллюстрирует рис. 2, заимствованный из его статьи «Из истории трехфазного тока» [4]. Доливо-Добровольский открыл потрясающее качество трехфазной системы: сумма трех токов в такой цепи в любой момент времени равна нулю. Таким образом, эту систему токов можно

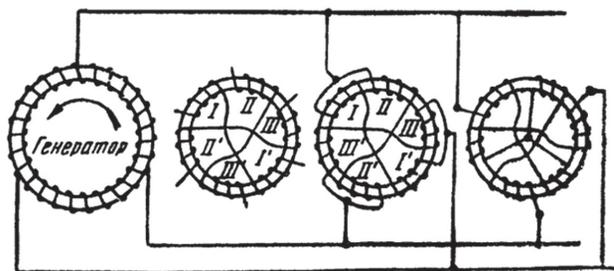


Рис. 2. «Трижды сопряженный ток» М.О. Доливо-Добровольского

Fig. 2. "Thrice conjugate current" by M.O. Dolivo-Dobrovolsky

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). Строго говоря, слово «drehstrom» является только яркой метафорой. В действительности ток не может вращаться. Более точным термином является выражение «многофазный переменный 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. В 1888 г. Михаил Осипович построил первый трёхфазный генератор переменного тока мощностью около 3 кВт.

Доливо-Добровольский приступил к разработке самого двигателя. Создавая электродвигатель, он использовал преимущества увеличения числа фаз с двух до трех. Это позволило ему получить лучшее распределение магнитного поля в асинхронном двигателе. Как уже отмечалось, к этому моменту 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 неравномерного распределения магнитного поля в двигателе. Действительно, при «идеальном» распределении обмотки по магнитопроводу результирующее вращающееся поле от наложения токов двух фаз синусоидально. В реальности, когда поле образовывается в двигателе всего несколькими катушками, его распределение сильно отличается от синусоиды. В таком случае помимо основного вращающего поля, создающего в якоре движущий момент, появляются пульсирующие поля, частота которых отличается от частоты основного поля. Эти пульсирующие поля оказывают тормозящее действие на якорь, что сильно сказывается на его КПД. Так, в случае применения двух катушек в двухфазном асинхронном двигателе пульсации поля достигают 41,4% максимальной амплитуды поля. В случае трехфазного двигателя пульсации уменьшаются до 15,5%, что при

определенном насыщении машины почти не влияет на ее работу. Дальнейшее увеличение фаз было нецелесообразно из-за увеличения количества проводов, питающих двигатель.

Другой удачей стало изобретение ротора асинхронного двигателя с беличьей клеткой. 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 обладал малым электрическим и магнитным сопротивлением. Такая конструкция ротора сохранилась и до наших дней.

Осенью 1888 г. мастерская «*АЕГ*» приступила к изготовлению первого 100-ваттного образца трехфазного асинхронного двигателя, и весной 1889 г. он был готов к первым испытаниям. Наступил момент истины. Доливо-Добровольский писал: «*АЕГ* пожелала сделать патентную заявку лишь после того, как из опытов «что-нибудь выйдет». Общий вид двигателя показан на рис. 3 [3].

В своем первом макете Доливо-Добровольский отказался от выполнения электродвигателя с выступающими полюсами, как у Теслы и Феррариса. Граммовская обмотка статора выполнялась распределенной по всей его окружности, что благоприятно сказалось на магнитном рассеянии. Обмотка была намотана на магнитопровод индуктора с «обращенными внутрь зубцами» (рис. 4).

Отметим интересную деталь: Михаил Осипович изготовил ротор с закрытыми «брауновскими» пазами, которые использовал в своих электрических машинах конструктор Чарльз Браун, о котором упоминалось выше. Такие пазы Доливо-Добровольский видел на заводе «Эрликон» и нашел это «...целесообразным как для уменьшения магнитного сопротивления воздушного зазора, так и для возможности обойтись без банда-

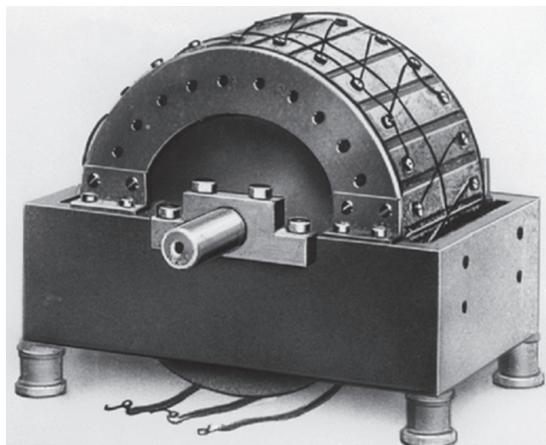


Рис. 3. Макет первого асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором

Fig. 3. Layout of the first asynchronous three-phase motor with a short-circuited rotor

жей в якорных стержнях». Чертеж ротора представлен на рис. 5 [3].

Обратимся к описанию первого пуска этого двигателя самим Михаилом Осиповичем: «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» [3].

Необходимо заметить, что далеко не все воспринимали тогда эту работу успешной. 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

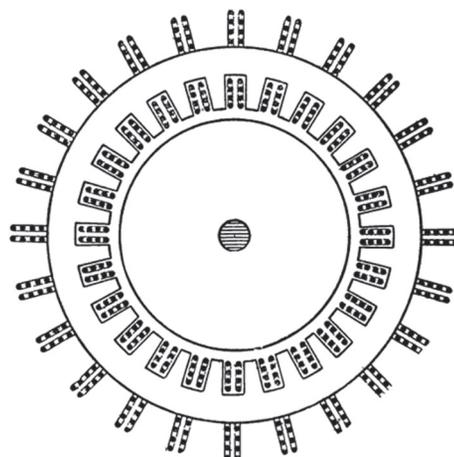


Рис. 4. Конструкция статора макета асинхронного двигателя с граммовской обмоткой

Fig. 4. The design of the stator of the asynchronous motor layout with a Gramme winding

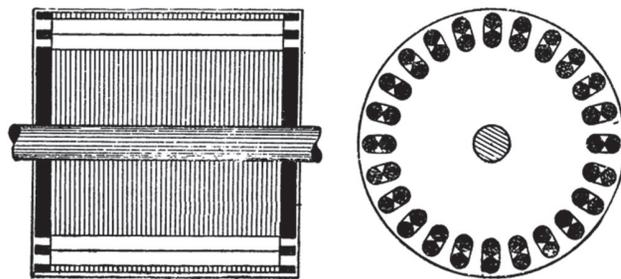


Рис. 5. Чертеж короткозамкнутого ротора макета асинхронного двигателя

Fig. 5. Drawing of the closed-loop rotor of the asynchronous motor layout

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!» [3].

В 1889 г. Доливо-Добровольский изобретает компактный трехфазный трансформатор. Конструкция его все время совершенствовалась (рис. 6), приобретая шаг за шагом современные черты – от Патента *DRP* № 56359 от 29 августа 1889 г. до трансформатора с тремя стержнями, расположенными в одной плоскости (Патент *DRP* № 79608 от 4 октября 1891 г.). В 1890 г. 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.

По заданию «*АEG*» Доливо-Добровольский спроектировал асинхронный электродвигатель на 3–5 л.с., который он выполнил «совершенно сходно с меньшим», только из технологических соображений ротор был шихтованным. Параллельно с двигателем был изготовлен и генератор трехфазного тока на 15–20 кВт, который был переделан из восьмиполусной динамо-машины. Начались испытания. Михаил Осипович охарактеризовал их как неудачные: «Пятисильный мотор... разочаровал меня своим относительно малым пусковым моментом, несмотря на более значительное возрастание тока при неподвижном роторе. При этом появился сильный шум, главным образом от вибрации всех соединений. Шум исчезал только при приближении к полному числу оборотов. Во время хода мотор потреблял небольшой ток и работал хорошо. При перегрузке примерно до полуторной величины он внезапно сдавал и начинал вести себя, как при пуске. Я тотчас

же понял, что здесь играют роль два обстоятельства: во-первых, относительно большое рассеяние главным образом на наружной стороне (спинке) индуктора, сходного с полем кольца Грамма, и во-вторых то, что короткозамкнутый якорь был слишком сильно замкнут накоротко по сравнению с первым пробным мотором» [3]. Таким образом, неудача в эксперименте привела Доливо-Добровольского к мысли, что пусковой момент двигателя зависит от сопротивления в обмотке ротора. В результате родился новый тип асинхронного двигателя – асинхронный двигатель с фазным ротором. Доливо-Добровольский пишет об этом моменте: «Тотчас же я дал задание мастерским приделать к этому электродвигателю новый якорь с изолированной обмоткой, к контактным кольцам. Я сразу выбрал для этого трехфазное сопряженное включение. Этот якорь с контактными кольцами скоро был готов. Тогда я смог, пользуясь переменными сопротивлениями (пусковыми реостатами), не только продемонстрировать хорошо запускаемый и хорошо выносящий нагрузку электродвигатель, но и регулировать его скорость, как это часто делается у двигателей постоянного тока» [3]. Схема асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 7.

В настоящее время асинхронный двигатель с фазным ротором (с контактными кольцами) широко применяется в условиях тяжелых пусков и регулирования скорости, например в дробилках и мельницах. Но тогда двигатель с кольцами на роторе «вызвал у многих (в том числе и у «*АEG*») некоторое чувство неуверенности». При всех достоинствах такого двигателя «его хотели иметь еще вдобавок и без щеток».

Новый двигатель был показан руководителям «*Эрликон*» Петру Эмилю Губеру и Чарльзу Брауну. Между дружественными компаниями был заключен договор о совместных исследованиях и разработках многофазных машин и электропередач [5]. Доливо-Добровольский и Чарльз Браун начали плодотворно сотрудничать над развитием систем с переменными токами. Так Чарльз Браун для оптимизации конструкции асинхронного двигателя провел на своем заводе серию экспериментов. Он изготовил четыре статора трехфазного двигателя различной конструкции, но с одинаковыми

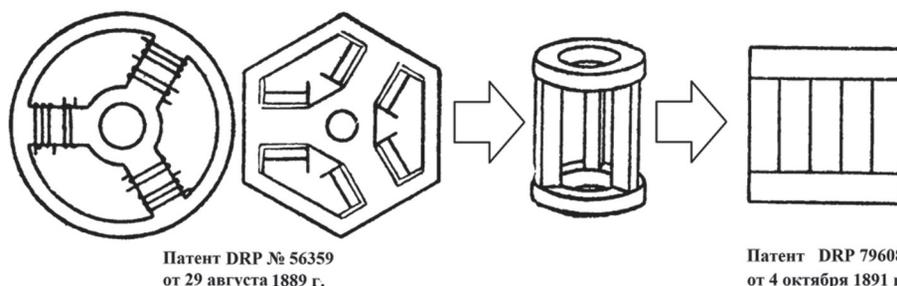


Рис. 6. Шаги эволюции трехфазного трансформатора

Fig. 6. Steps in the evolution of a three-phase transformer

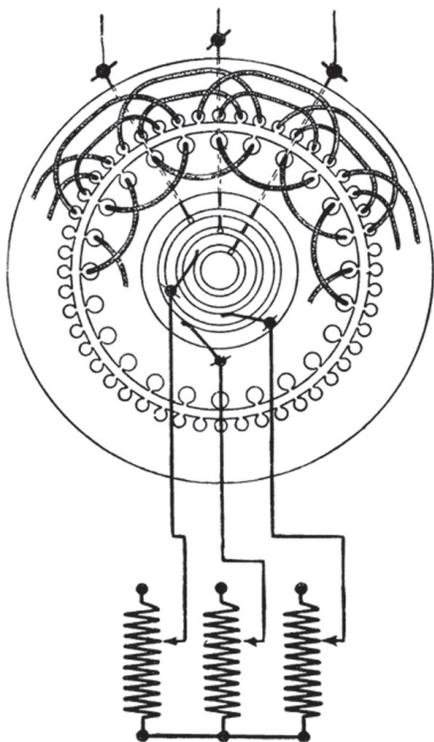


Рис. 7. Схема асинхронного двигателя с фазным ротором

Fig. 7. Diagram of an asynchronous motor with a phase rotor

внутренними диаметрами. Аналогично были сделаны и одиннадцать роторов, которые могли вращаться в любом из четырех статоров. Таким образом, Браун получил возможность испытать 44 варианта асинхронного двигателя и сравнить полученные электромеханические характеристики [6, 7]. В результате Браун выбрал в качестве основной конструкцию ротора в виде шихтованного магнитопровода с беличьей клеткой; статор и ротор имели закрытые пазы. В 1891 г. Браун начинает производить асинхронный электродвигатель мощностью 20 л.с., вошедший в техническую литературу под названием «электродвигатель трехфазного тока системы Брауна». Двигатель имел многополюсную распределенную барабанную обмотку и короткозамкнутый ротор. На тот момент это был самый совершенный с современной точки зрения трехфазный асинхронный двигатель [7].

В конце 1889 г. было объявлено о проведении Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне. Техническим директором был назначен Оскар фон Миллер – активный сторонник новых решений в электротехнике [8, 9]. В это же время были проведены переговоры Оскара фон Миллера с руководством «АЕГ» и «Эрликон». Была обсуждена возможность участия этих компаний в выставке с демонстрацией дальней высоковольтной трехфазной электропередачи. Участники переговоров приняли решение о более детальной проработке вопроса, поскольку имелись большие финансовые и репутационные риски.

Наконец, 23 марта 1891 г. прошло совещание, на котором окончательно прорисовались детали по строительству электропередачи. Знаменитый электротехник Гисберт Капп в своей статье «Лауфен-Франкфуртская передача энергии» подробнейшим образом описал схему этого проекта [10]. Г. Капп был прекрасно осведомлен обо всех подробностях строительства, знал его участников, поэтому для описания основных элементов электропередачи воспользуемся его статьей как информацией из первых рук (рис. 8).

На гидростанции реки Неккар турбина должна была вращать вал трехфазного генератора G мощностью 300 л.с., 150 об/мин, 95 В, 40 Гц (рис. 9). Три «группы» (фазы) обмоток генератора обозначены на схеме толстыми линиями ОI, ОII, ОIII. Далее медные шины от генератора подходили к распределительному щиту (рис.10) с тремя амперметрами – А1, А2, А3, и тремя вольтметрами – V1, V2, V3. На щите также находились амперметр и вольтметр динамо-машины для возбуждения трехфазного генератора, а также предохранители F и магнитные реле $R1, R2, R3$. Реле были настроены на минимальный и максимальный токи. В случае, если ток в какой-нибудь фазе падал ниже минимального значения или превышал максимально допустимое, то реле отключало ток возбуждения генератора, и он начинал работать при остаточном намагничивании, что было безопасно даже при коротком замыкании в первичной цепи. В результате отключения тока возбуждения гидротурбина должна была стремительно увеличить свою скорость из-за падения тока нагрузки генератора. Этот момент должен был отследить машинист электростанции, который принимал незамедлительное решение – остановить турбину или нет. Можно видеть, что доска приборов была сконструирована очень наглядно и просто. Обмотки генератора соединялись с первичными обмотками трансформаторов T и через нулевой провод ОО, который в свою очередь был заземлен

От распределительного щита шины подходили к первичным обмоткам трансформаторов T , обозначенных на схеме толстыми линиями ОI, ОII, ОIII. Всего было три повышающих масляных трансформатора с призматической формой магнитопровода. Трансформаторы можно было соединять друг с другом, изменяя этим напряжение. Во вторичной цепи высокого напряжения, обозначенной тонкими пунктирными линиями, не было коммутаторов, а имелись только плавкие предохранители $F1, F2$ и $F3$. Гисберт Капп описывает еще одну существенную защиту электропередачи, предохраняющую от случая, если один из высоковольтных проводов случайно упадет на землю. Как видно из схемы (рис. 8), общее соединение ОО первичной и вторичной цепей трансформаторов в Лауфене проходило через предохранитель $F0$. Поэтому соединение ОО находилось в постоянном соединении с землей. Капп пишет: «Предположим теперь, что провод линии 1 оборвался в какой-нибудь точке между Лауфеном и Франкфуртом и упал на землю; оборван-

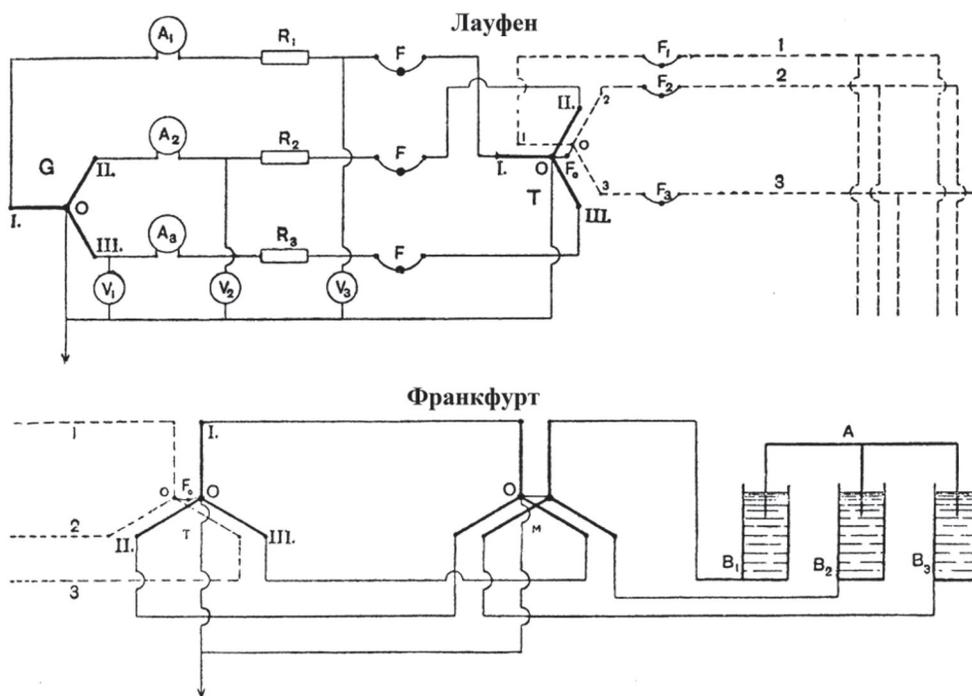


Рис. 8. Полная принципиальная схема Лауфен-Франкфуртской электропередачи

Fig. 8. Complete schematic diagram of the Laufen-Frankfurt power transmission

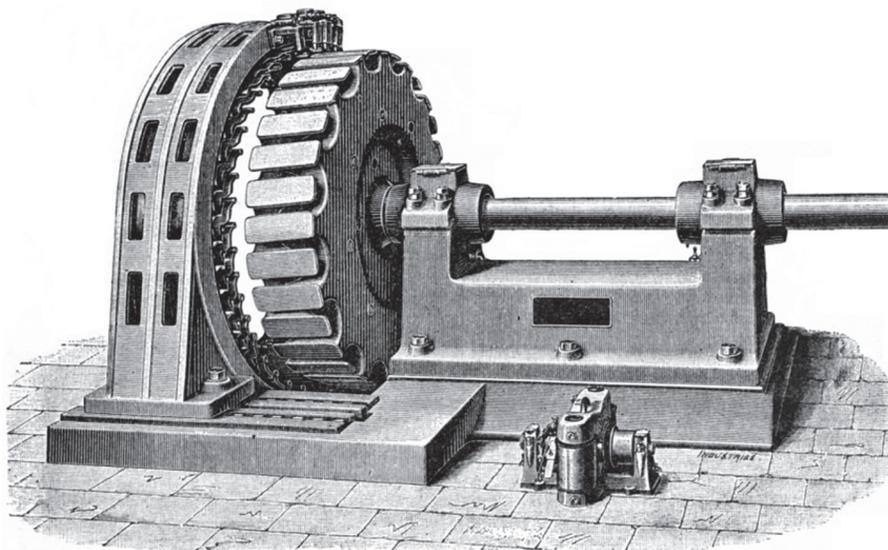


Рис. 9. Трехфазный синхронный генератор конструкции Ч. Брауна

Fig. 9. Three - phase synchronous generator design Ch. Brown

ный конец прикоснется к земле и соответствующий плавкий предохранитель $F1$ в Лауфене расплавится. Возможно, что расплавится также соединительный предохранитель $F0$. Таким образом, линия 1 прерывается. По всей вероятности, расплавится также и предохранитель в цепи 1 низкого напряжения; но если этого не случится, то ток в этой ветви значительно понизится и приведет в действие реле $R1$; вследствие чего ... прервется намагничивание и опасное напряжение немедленно пропадет во всех трех проводах линии» [10].

Далее следовала линия электропередачи длиной в 170 км (рис. 11). На территории выставки во Франкфурте находились три понижающих трансформатора, первичные и вторичные обмотки которых также соединялись с землей по аналогии с Лауфенскими трансформаторами. Понижающие обмотки трансформатора были подключены к 1000 электролампов напряжением 65 В каждая, смонтированных на огромном щите, и к асинхронному электродвигателю (100 л.с., 600 об/мин). Электродвигатель приводил в действие гидравли-

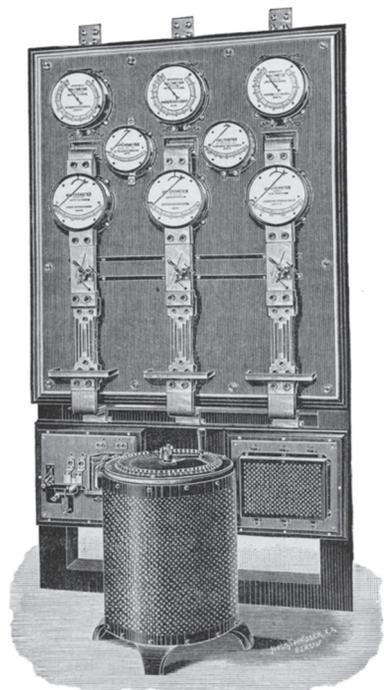


Рис. 10. Приборный щит электростанции в Лауфене

Fig. 10. Instrument panel of the Laufen power plant

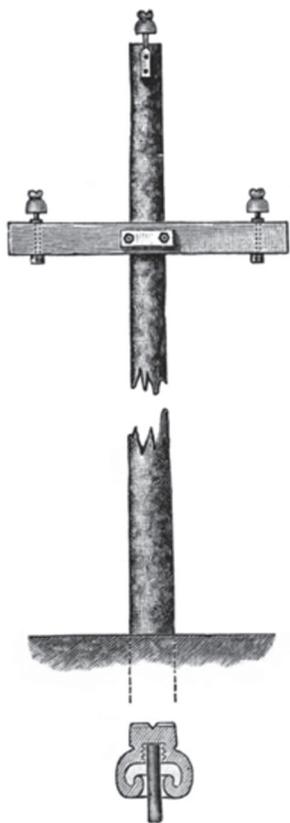


Рис. 11. Опора линии электропередачи

Fig. 11. Power line support

ческий насос, качающий воду для искусственного водопада высотой около десяти метров. Приборный щит во Франкфурте показан на рис. 12.

Получалось так, что энергия водопада реки Неккар в Лауфене чудесным образом передавалась по проводам за 170 км и превращалась опять в водопад, но уже во Франкфурте (рис. 13) [11].

Зоны ответственности участников проекта были следующие: «*АЕГ*» поставляла четыре трехфазных трансформатора (два в Лауфене и два во Франкфурте), асинхронный двигатель для водопада мощностью 100 л.с. и распределительные щиты. Компания «*Эрликон*» производила трехфазный синхронный генератор и два трансформатора. Медный провод длиной в 170 км был взят в аренду.

Конструкция «100-сильного» асинхронного двигателя Доливо-Добровольского получилась весьма необычной (гравюра двигателя представлена на обложке журнала). Во время одного из частых посещений Доливо-Добровольским завода «*Эрликон*» Чарльз Браун показал ему проект только что сконструированного им трехфазного синхронного генератора для электростанции в Лауфене. Генератор имел высокий КПД и был очень компактным для своего времени. Однако Доливо-Добровольский заметил и серьезные недостатки в конструкции. Ротор генератора был гребенчатой формы с клювообразными полюсами и обладал очень большим магнитным рассеянием. Это обязательно должно было привести к резким падениям напряжения при изменении нагрузки, особенно в момент пуска

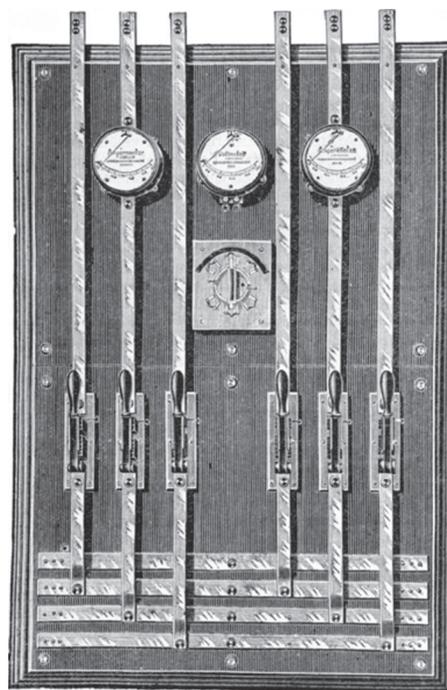


Рис. 12. Приборный щит электростанции во Франкфурте

Fig. 12. Instrument panel of the power plant in Frankfurt

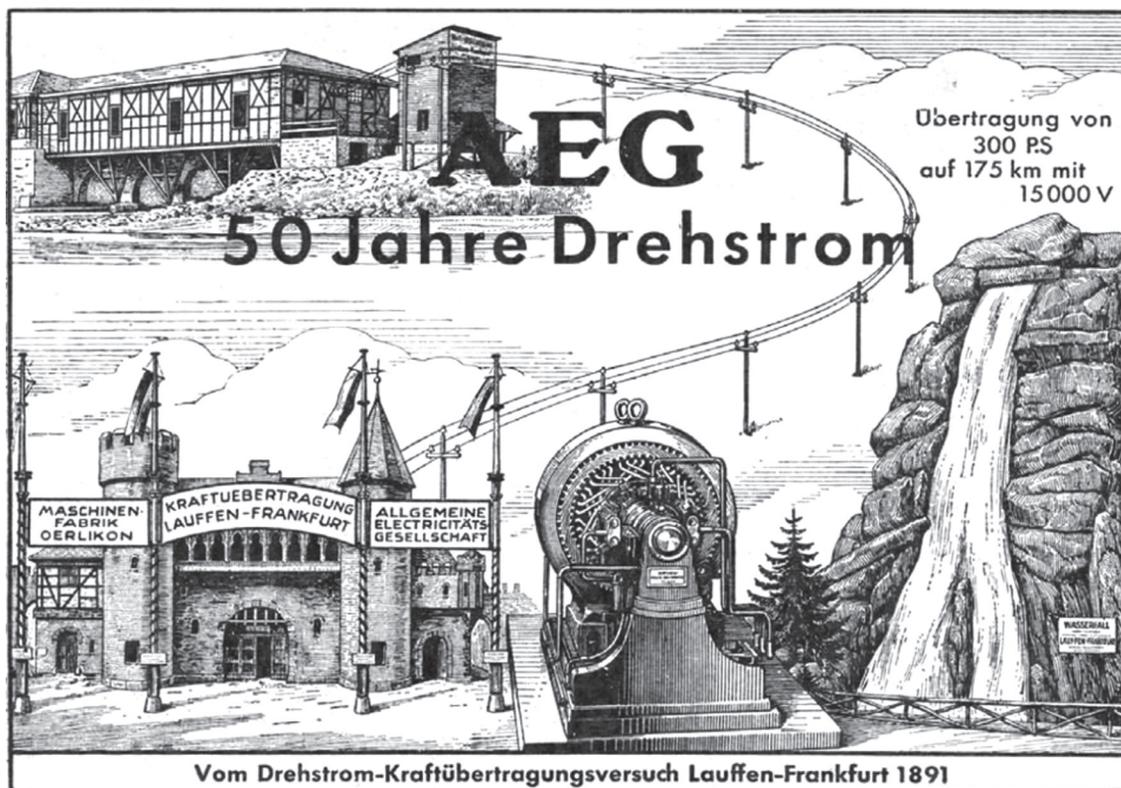


Рис. 13. Плакат трехфазной электропередачи 1891 г.

Fig. 13. Poster of three-phase power transmission in 1891

асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Как известно, пусковые токи в таком двигателе могут в несколько раз превышать номинальные. Отягчающим фактом было то, что мощность асинхронного двигателя в 100 л.с. была соизмерима с мощностью сети в 300 л.с. При падении же напряжения уменьшался в квадратичной степени пусковой момент и двигатель попросту не смог бы запуститься. Недостаток генератора Брауна был учтен в конструкции асинхронного двигателя. Пришлось Доливо-Добровольскому сделать свой двигатель не только с фазным ротором, но и обращенным. Напряжение подводилось не к статору, а к ротору с помощью трех колец. Таким образом, уменьшались потери в стали, которые пропорциональны массе магнитопровода. Якорем являлся статор двигателя, имеющий волновую обмотку с выводами к жидкостному реостату. Кроме того, из-за неуверенности в том, что электропередача сможет успешно работать при напряжении 15000 В, все создавалось с учетом нескольких ступеней напряжения. Второй ступенью было 25000 В. Поэтому двигатель проектировался также для работы при двух напряжениях: 112–220 В. Обратные концы обмоток индуктора, расположенного на роторе, были выведены к еще трем кольцам по другую сторону вала и могли переключаться из «треугольника» на «звезду». Таким образом, асинхронный двигатель получился довольно непростой конструкции. В момент пуска двигателя использовался жидкостный реостат, который

состоял из трех сосудов, электрически изолированных друг от друга, с раствором каустической соды $B1$, $B2$ и $B3$ (рис. 8). В емкости опускались механическим способом медные пластины. Интересно объяснение Каппом необходимости такого реостата читателям своей статьи, которые только знакомились с новым типом двигателя: «При пускании в ход пластинки погружаются только незначительно и сопротивление, которое при этом вводится в каждую из трех цепей якоря, не позволяет образоваться в якоре ненормально сильным токам, которые иначе отбросили бы прочь поле. По мере увеличения хода двигателя пластинки опускаются все больше и больше, пока, наконец, не замкнется ветвь жидкого сопротивления; двигатель тогда начнет работать без внешней потери энергии» [10].

До открытия выставки оставалось всего два месяца. Преодолевая большие технические и организационные трудности, команда принялась за работу. Это была авантюра – «прыжок» без гарантии удачного приземления [11]. Ситуация еще более усложнилась в результате выхода из проекта Чарльза Брауна, который решил создать свою компанию по производству электрических машин вместе со своим напарником Вальтером Бовери [8].

Накануне официального запуска электропередачи было подано питание в линию. Не сдерживая эмоций, М.О. Доливо-Добровольский забрался на столб и крикнул: «Электричество дошло до Франкfurта!...

и причем это электричество – из лучшего, трехкратно сопряженного переменного тока, подлинного трехфазного переменного!» [12]. Еще один факт говорит об отваге русского электротехника. Для того чтобы показать публике безопасность электропередачи, провели рискованный эксперимент. При наличии напряжения в линии электропередачи специальным приспособлением обрезали один из проводов, который с грохотом и со снопом искр упал на рельсы железной дороги. Через мгновение Михаил Осипович подошел и взялся за провод незащищенной рукой.

25 августа зажглось 1000 электрических ламп накаливания на Франкфуртской выставке от электричества, выработанного за 170 км в Лауфене. Лампы составляли надпись: «Линия электропередачи Лауфен – Франкфурт». На следующий день был испытан «100-сильный» асинхронный двигатель, который был подключен к насосу, качающему воду для водопада (рис. 14).

Доливо-Добровольский смог наконец-то облегченно вздохнуть и констатировать: «... когда был подан ток из Лауфена, я пережил гордое сознание того, что «прыжок» удался и в первую очередь, что расчеты были совершенно правильными. Единственным недостатком электродвигателя был его несколько тонкий вал. Это вызывало, в особенности при определенном числе оборотов, склонность к вибрации» [3]. На стен-

дах компаний «АЕГ» и «Эрликон» демонстрировалось несколько асинхронных электродвигателей меньшей мощности.

В рамках электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне в сентябре был проведен Международный конгресс электротехников, на котором присутствовало около 700 ученых, инженеров, предпринимателей, чиновников, банкиров и журналистов. Доливо-Добровольский выступил с докладом «Передача энергии посредством переменных токов различных фаз». Трехфазные токи были самой обсуждаемой темой конгресса, а Михаил Осипович, которому было в тот момент всего 29 лет, приобрел всемирную известность как создатель удобной на практике системы переменных токов. Испытания трехфазной электропередачи, проведенные специальной комиссией, показали блестящий результат. Общий КПД (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) при напряжении 15000 В составил 75,2 %. В те дни техническая и научно-популярная пресса была полна восторженных отзывов об изобретении Доливо-Добровольского, некоторые из которых можно прочесть в статье журнала «Электричество», посвященной 120-летию Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне [11].



ur Lauffener Kraftübertragung:
Das Schild mit den 1000 Glühlampen und
der Wasserfall.

Рис. 14. Иллюстрация Франкфуртской выставки с водопадом и вывеской

Fig. 14. Illustration of the Frankfurt Exhibition with a waterfall and a sign

Не следует думать, что первые десятилетия трехфазных токов были простыми и безоблачными. Эта система встретила жесткую конкуренцию со стороны как постоянного, так и со стороны одно- и двухфазных токов. Чарльз Браун, один из создателей Лауфен-Франкфуртской электропередачи, активный разработчик первых трехфазных двигателей, организовав свою фирму по производству электрических машин, повел себя далеко не лучшим образом, обрушившись с критикой на М.О. Доливо-Добровольского. Браун приписывал только себе разработку первого практически пригодного асинхронного двигателя, а трехфазную систему вообще считал изобретением Николы Теслы, закрепленной его патентами. Браун насмехался над контактными кольцами асинхронного «100-сильного» двигателя Доливо-Добровольского, о котором уже говорилось выше. Причем Браун скрыл тот факт, что такая конструкция асинхронного двигателя была обусловлена его собственной ошибкой при проектировании генератора. По мнению Чарльза Брауна, Лауфен-Франкфуртскую трехфазную электропередачу на 170 км следовало делать однофазной, что повысило бы надежность всей системы [12]. И это отзывы бывшего коллеги, напарника, соратника Михаила Осиповича. Что тут говорить о конкурентах, основавших свой бизнес только на постоянном токе.

Время расставило все на свои места. Шаг за шагом трехфазные токи отвоевывали себе новое пространство, став доминирующей электрической системой во всем мире. Имя М.О. Доливо-Добровольского по праву стоит в одном ряду с самыми выдающимися электротехниками. Многие государства считают этого человека своим. Россияне – русским, поскольку он родился в России, был православным, думал и писал по-русски, и никогда не прерывал связи с родиной. Поляки считают Michał Doliwo-Dobrowolskiego – поляком, так как его отец происходил из древнего польского рода. «Ассоциация польских электриков» (SEP) каждый год проводит мероприятия в честь изобретателя трехфазных токов, а одна из медалей SEP носит его имя. Для немцев Michail von Dolivo-Dobrowsky – немец, потому что он почти всю жизнь проработал в Германии и сделал для этой страны много хорошего.

Удивителен факт, что во время Сталинградской битвы в январе 1943 г. на страницах советского журнала «Наука и жизнь» была напечатана статья о немецкой электропередаче из Мисбах в Мюнхен 1882 г., которую осуществил Оскар фон Миллер [13, 14]. При подготовке этой статьи найден еще один интересный факт, говорящий, что даже в тяжелейших условиях противостояния, цензуры и пропаганды находится место для общечеловеческих ценностей. В августе 1941 г. в Германии отмечалось 50-летие Лауфен-Франкфуртской электропередачи. Журнал Ассоциации немецких инженеров писал: «Промышленный асинхронный дви-

гатель можно рассматривать как результат работы Доливо-Добровольского, в результате чего в 1889 г. был изготовлен первый лабораторный двигатель малой мощности. ... Это стало отправной точкой для широкого развития трехфазного двигателя, который с тех пор находит все более широкое применение» [15].

Имя М.О. Доливо-Добровольского объединяет народы, их достижения и славные страницы истории. И это его главная заслуга!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ferraris G.** Rotazione elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate. – Atti della Reale Accademia delle scienza di Torino, 1888, vol. XXXI, No. 9, pp. 333–348.
2. **Веселовский О.Н.** Михаил Осипович Доливо-Добровольский. М.: Госэнергоиздат, 1958, 273 с.
3. **Доливо-Добровольский М.О.** Избранные труды (о трехфазном токе). М., Л.: Госэнергоиздат, 1948, 215 с.
4. **Dolivo-Dobrowsky M.** Aus der Geschichte des Drehstroms. – Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 38, 1917, Heft 26, pp. 341–344, Heft 27, pp. 354–357, Heft 28, pp. 366–369, Heft 29, pp. 376–379.
5. **Бородин Д.А., Бородин В.Д.** Чарльз Браун. У истоков электроэнергетики. М.: ЦИТ, 2013, 152 с.
6. **Томпсон С.** Многофазные электрические токи и двигатели переменного тока / Пер. с англ. М.А. Шателена. СПб.: Издание журнала «Электричество», 1898, 251 с.
7. **Беспалов В.Я., Бородин Д.А., Бородин В.Д.** Чарльз Браун (1863–1924) – ученый, инженер, предприниматель (к 150-летию со дня рождения). – Электричество, 2013, № 2, с. 64–71.
8. **Füßl W.** Oskar von Miller: 1855–1934: Eine Biographie. München: Beck, 2005, 452 p.
9. **Lang N. Charles E.L.** Brown 1863–1924, Walter Boveri 1865–1924. Gründer eines Weltunternehmens, Verein für wirtschaftshistorische Studien Melien, 2000, 95 p.
10. **Капп Г.** Лауфен-Франкфуртская передача энергии. – Электричество, 1891, № 20, с. 282–284.
11. **Бородин Д.А., Бородин В.Д.** Юбилей первой электропередачи трехфазного тока (к 120-летию Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне). – Электричество, 2012, № 2, с. 61–70.
12. **Neidhöfer G.** Michael von Dolivo-Dobrowsky und der Drehstrom. Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung. Berlin: VDE-Verl., 2008, 304 p.
13. **Бородин Д.А., Бородин В.Д.** Богиня Электричества. – Электричество, 2016, № 8, с. 4–17.
14. **Радовский М.И.** Первые опыты передачи электрической энергии. – Наука и жизнь, 1943, № 1–2, с. 44–47.
15. **L'istoriquedu** moteur triphasé. Le Génie civil: revue générale des industries françaises et étrangères. 62-e année, Paris, 1942, vol. CXIX, No. 13, 145 p.

[25.11.2021]



Автор: Бородин Дмитрий Анатольевич – кандидат техн. наук, ведущий инженер-конструктор ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром», Москва, Россия.

"Drehstrom" – Rotating Current (On the 160th Anniversary Since the Birth of M.O. Dolivo-Dobrovolsky)

BORODIN Dmitry A. (LLC «Engineering Center «Ruselprom», Moscow, Russia) – Leading Design Engineer, Cand. Sci. (Eng.).

The article is devoted to the beginning of the activity of Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky. The end of the 1880s is characterized by the rapid development of alternating current technologies. The works of G. Ferraris, C.S. Bradley, N. Tesla, J. Venstrom, F.A. Heselvander and other electrical engineers significantly advanced the theory and practical use of alternating current. Nevertheless, the level of development of new electrical devices was still low, which hindered their widespread use. Within a relatively short period of time from 1888 to 1891, Dolivo-Dobrovolsky developed a practically suitable electrical system based on three-phase currents. Mikhail Osipovich developed a simple, reliable three-phase induction motor with excellent electromechanical characteristics and together with it the entire chain of three-phase devices for generating, transporting and distributing electricity: three-phase transformers, generators, and power lines. Dolivo-Dobrovolsky's ideas were brilliantly embodied in the 170-km long Laufēn–Frankfurt power transmission, which became a vivid example for electrical engineers around the world and an impetus for further widespread use of three-phase current.

K e y w o r d s: *M.O. Dolivo-Dobrovolsky, three-phase induction motor, three-phase current system, Laufēn–Frankfurt power transmission, International Electrotechnical Exhibition in Frankfurt am Main*

REFERENCES

1. **Ferraris G.** Rotazione elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate. – Atti della Reale Accademia delle scienza di Torino, 1888, vol. XXXI, No. 9, pp. 333–348.
2. **Veselovskiy O.N.** *Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolskiy* (Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky). M.: Gosenergoizdat, 1958, 273 p.
3. **Dolivo-Dobrovolskiy M.O.** *Izbrannye trudy (o trekhfaznom toke)* (Selected Works (on Three-Phase Current)). M., L.: Gosenergoizdat, 1948, 215 p.
4. **Dolivo-Dobrovolsky M.** Aus der Geschichte des Drehstroms. – Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 38, 1917, Heft 26, pp. 341–344, Heft 27, pp. 354–357, Heft 28, pp. 366–369, Heft 29, pp. 376–379.
5. **Borodin D.A., Borodin V.D.** *Charlz Braun. U istokov elektroenergetiki* (Charles Brown. At the Origins of the Electric Power Industry). M.: TsIT, 2013, 152 p.
6. **Tompson S.** *Mnogofaznye elektricheskie toki i dvigateli peremennogo toka* (Multiphase electric currents and AC motors) / Transl. from the English by M.A. Chatelain. SPb.: Izdanie zhurnala «Elektrichestvo», 1898, 251 p.
7. **Bespalov V.Ya., Borodin D.A., Borodin V.D.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 2, pp. 64–71.
8. **Füßl W.** Oskar von Miller: 1855–1934: Eine Biographie. München: Beck, 2005, 452 p.
9. **Lang N. Charles E.L.** Brown 1863–1924, Walter Boveri 1865–1924. Gründer eines Weltunternehmens, Verein für wirtschaftshistorische Studien Melien, 2000, 95 p.
10. **Kapp G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1891, No. 20, pp. 282–284.
11. **Borodin D.A., Borodin V.D.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 2, pp. 61–70.
12. **Neidhöfer G.** Michael von Dolivo-Dobrovolsky und der Drehstrom. Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung. Berlin: VDE-Verl, 2008, 304 p.
13. **Borodin D.A., Borodin V.D.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 8, pp. 4–17.
14. **Radovskiy M.I.** *Nauka i zhizn' – in Russ. (Science and Life)*, 1943, No. 1–2, pp. 44–47.
15. **L'istoriquedu** moteur triphasé. Le Génie civil: revue générale des industries françaises et étrangères. 62-e anné, Paris, 1942, vol. CXIX, No. 13, 145 p.

[25.11.2021]