

## Из истории электротехники

### Юбилей первой электропередачи трехфазного тока<sup>1</sup>

*(К 120-летию Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне)*

Но все же риски были действительно очень велики. «Эрликон» обязался провести в кратчайшие сроки серию предварительных опытов. Немедленно была построена экспериментальная установка, получившая название «Система дальней электропередачи «Эрликон». Чарльз Браун изготовил срочно два однофазных масляных трансформатора: один для повышения, второй для понижения напряжения. Генератор переменного тока с номинальным напряжением 100 В приводился в движение заводским электродвигателем, напряжение регулировалось изменением числа оборотов двигателя. Браун как паутиной опутал параллельными рядами проводов заводской двор. Медный провод толщиной 4 мм был закреплен с использованием многочисленных изоляторов на опорах, отстоящих друг от друга на 25 м. Провешивая через них провод в одну и в другую сторону на расстоянии не менее 30 см друг от друга, получили линию электропередачи протяженностью 10 км. У другого конца линии был трансформатор, понижающий напряжение снова до 100 В. Во вторичную цепь была подключена нагрузка в виде ламп накаливания. С середины ноября 1890 г. почти каждый день проводились эксперименты.

Прорыв на переговорах произошел 6 декабря 1890 г. в Мюнхенском офисе Оскара фон Миллера. Присутствовали все участники проекта. После шестичасового совещания была достигнута предварительная договоренность о распределении между фирмами заказов на изготовление основного оборудования. За Миллером оставались организационное планирование работ по прокладке линии и получение разрешений от земель, через которые она пройдет; необходимо было также убедить почтовое ведомство взять на себя стоимость работ по протягиванию проводов. Было также принято решение о демонстрации экспериментальной установки «Эрликон» комиссии, состоящей из представителей властей и экспертов из Германии. Дополнительно на опорах экспериментальной установки рядом с проводами высокого напряжения протянули телефонный провод. Таким образом, при демонстрации эксперимента намеревались развеять опасения

почтового ведомства относительно возможности возникновения сильных помех для работы телефона и телеграфа от линии высокого напряжения. Этот вопрос имел особое значение в связи с тем, что запланированная передача электрической энергии из Лауфена во Франкфурт должна была проходить по линии, проложенной вдоль железнодорожного полотна, рядом с которым проходили телеграфные линии.

24 января 1891 г. начались публичные эксперименты. На них присутствовали представители выставки, правительств германских земель, по территории которых должна была пройти электропередача, управления телеграфа, государственного управления почт. Опыты с уровнями напряжения 22000–33000 В дали хорошие успокаивающие результаты. Определялось минимальное расстояние между проводами, при котором мог бы произойти пробой по воздуху. Примерно на середине линии к каждому проводу прикрепили по две перпендикулярные проводам проволоки, и затем концы последних сближали. «При разности потенциалов в 22000 В искра разряда появилась лишь тогда, когда концы проволок были сближены на расстояние в 22 миллиметра». Имитировали также погодные условия, в частности дождь, поливая из брандсбойда провода, изоляторы, столбы и деревянные поперечины. Испытания на помехи от линии электропередачи в телефонных проводах показали также неплохой результат: «Что касается характерного жужжащего шума в телефоне вследствие индуктивного влияния переменных токов на телефонный провод, то оно оказывается далеко не таким резким и мешающим разговору». Проводились тщательные эксперименты, имитирующие всевозможные аварийные ситуации: короткое замыкание на линии, падение провода на землю или обрыв линии с повисанием концов.

Итог экспериментов был следующий: «Описанные опыты убеждают, что применение самых простых приспособлений может совершенно устранить возможность несчастного случая. Вся система может считаться настолько разработанной, что позволяет приступить непосредственно к практическому применению её». Одновременно Доливо-Добровольский продемонстрировал действующую

<sup>1</sup> Окончание. Начало см. в № 1, 2012.

ший макет трехфазной электропередачи с асинхронным двигателем в 0,75 кВт. Таким образом, возможность создания передачи высокого напряжения была доказана.

Вновь откомандированный на завод «Эрликон» Доливо-Добровольский проводит вместе с Брауном «негласные» опыты с имеющимся оборудованием и приобретает еще большую уверенность. По возвращении он успокаивает Ратенау: «Напряжения до 25000 В не представляют ни малейшего риска в отношении неудачи опыта, и свечение проводов и изоляторов, а также прочие «жуткие явления» могут привести к непредвиденным последствиям только при напряжении 35000–40000 В». Однако Ратенау успокоился лишь после того, как Доливо-Добровольский предложил ему использовать для передачи два последовательно включенных трансформатора. Сначала работать с напряжением в 15000–16000 В и только затем с двойным напряжением. Все это ярко иллюстрирует уровень знаний электротехников того времени и показывает насколько этот проект был революционен.

Однако у самих участников проекта после многочисленных экспериментов окрепла уверенность в правильности технических решений. 9 февраля 1891 г. Браун сделал во Франкфурте важный доклад, обобщающий многочисленные эксперименты с высоким напряжением: «Токи высокого напряжения, их получение, передача и применение». Он убедительно доказывал экономическую целесообразность передачи токов высокого напряжения, которую, как уже было сказано выше, подвергали сомнению многие специалисты. Главная мысль доклада звучала так: «Передача электрической энергии посредством использования напряжений, например, порядка 30000 В позволит нам осуществлять распределение энергии по линиям электропередачи на очень большое расстояние и тем самым начать использование некоторых пока еще спящих источников энергии, поставив блага, даваемые электрическим током, на службу всей промышленности в обширных масштабах». В заключение Браун высказал уверенность в успехе будущего проекта: «Даже выставка, которая будет проводиться здесь в ближайшие месяцы, послужит делу получения новых достижений в данной области и укрепления веры тех, у кого еще остались сомнения, в огромное значение и производительность электротехники». Вскоре, 20 марта 1891 г., выходит обстоятельная статья Доливо-Добровольского в журнале «*Elektrotechnische Zeitschrift*» под названием «Передача энергии посредством переменных токов различных фаз (Drehstrom)». Следует заметить, что это была первая статья Михаила Осиповича на тему трехфазных токов. До этого руководство AEG за-

прещало ему подобные публикации. Статья в первую очередь преследовала цель привлечь внимание к многофазному переменному току как к новому средству передачи энергии на большие расстояния и давала общий обзор систем многофазного тока. Вместе с тем в статье убедительно доказывались преимущества именно трехфазных систем. Автор подчеркивал, что кропотливая техническая проработка привела «систему к такому совершенству, что стали возможными такие смелые предприятия, как передача энергии из Лауфена во Франкфурт». Доливо-Добровольский завершил свою работу словами надежды на то, что «электропередача Лауфен – Франкфурт даст ему возможность продемонстрировать на практике свою систему большому кругу электриков».

22 февраля 1891 г. состоялось заседание IV (электротехнического) Отдела Императорского Русского Технического Общества. Председательствующий на нем Владимир Яковлевич Флоренсов подробно рассказал о готовящейся трехфазной электропередаче из Лауфена во Франкфурт. Это известие сильно заинтересовало присутствующих. Было подчеркнуто, что «предложенный опыт передачи будет иметь громадное значение для электротехники и может дать ей совершенно новое направление». В.Я. Флоренсов закончил свое сообщение изложением сведений о Доливо-Добровольском. В частности, Владимир Яковлевич сказал: «Вся эта установка делается по идее и под руководством нашего соотечественника М.О. Доливо-Добровольского, который пользуется большим уважением и доверием среди немецких электротехников». На заседании принято решение создать специальную комиссию для поездки во Франкфурт и на страницах журнала «Электричество» подробно извещать читателей о предстоящей выставке и трехфазной электропередаче. Надо сказать, что «Электричество» посвятило этому событию столько места, сколько не уделяло ни одной выставке за всю свою долгую историю. В каждом номере за 1891 г. имеются увлекательные публикации на эту тему.

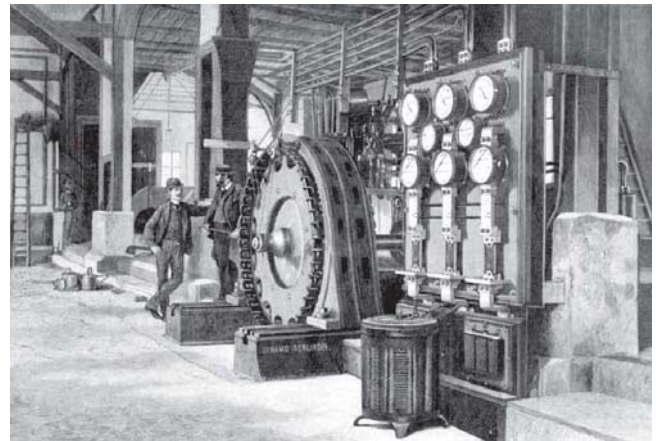
Наконец, только 23 марта 1891 г. происходит совещание, на котором детально обсуждается проект будущей Лауфен-Франкфуртской электропередачи. На гидростанции р. Неккар турбина должна была вращать через коническую передачу вал трехфазного генератора (300 л. с., 150 об/мин, 95 В, 40 Гц). Медные шины от генератора подходили к распределительному щиту с амперметрами и вольтметрами, предохранителями и другой аппаратурой. Затем следовала комбинация из трех повышающих масляных трансформаторов с призматической формой магнитопровода. Трансформаторы можно

было соединять друг с другом, изменяя этим напряжение. Далее сооружалась 170-километровая высоковольтная трехфазная линия электропередачи. Во Франкфурте на выставочной площади установили три понижающих трансформатора, от которых питалось 1000 электроламп (65 В каждая), смонтированных на огромном щите, и асинхронный электродвигатель (100 л. с., 600 об/мин). Электродвигатель приводил в действие гидравлический насос, качающий воду для искусственного водопада высотой около 10 м. Получалось так, что энергия водопада р. Неккар в Лауфене чудесным образом передавалась по проводам за 170 км и превращалась опять в водопад, но уже во Франкфурте. Эта идея повторяла эксперимент электропередачи от Мисбаха до Мюнхена 1882 г. Там тоже был искусственный водопад. Это был фирменный знак Миллера – метафорический «круг воды и электричества». Но масштабы этих двух электропередач были, конечно, несопоставимы.

Работа распределялась следующим образом. Доливо-Добровольский руководил изготовлением четырех трехфазных трансформаторов по два с каждой стороны электропередачи и асинхронного двигателя мощностью 100 л. с. Фирма АЕГ поставляла распределительные щиты с необходимой аппаратурой. Браун отвечал за установку в Лауфене синхронного генератора трехфазного тока и монтаж еще двух дополнительных трансформаторов – по одному на каждом конце линии. Медный провод для линии электропередачи предоставляла на условиях аренды фирма «Ф.А. Гессе и сыновья». Проект линии поручался инженеру Фридриху Эберту.

Но это были только идеи, практически нереализованного плана, а до открытия выставки оставалось менее двух месяцев... Не было еще ни чертежей, ни электротехнических устройств, ни линии электропередачи. Не было даже опыта проектирования мощного трехфазного электрооборудования. Как поведет себя вся электрическая система такого масштаба в целом? Какие сюрпризы преподнесет трехфазное высокое напряжение? Это была авантюра – прыжок без гарантии удачного приземления. Доливо-Добровольский писал о том времени: «О создании электродвигателей промежуточной величины или об ускоренной опытной конструкции, после чего можно было бы перейти к окончательному типу, не могло быть и речи вследствие чрезвычайно короткого срока. Двигатель нужно было просто построить, и он должен был работать и даже выдерживать критику всего электротехнического мира и экспертной комиссии. Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмыслимого позора и подвергнуть его недоверию, которое вряд ли удалось бы потом быстро рассеять, я обязан был

принять на себя эту задачу и разрешить ее. В противном случае опыты Лауфен – Франкфурт и многое, что должно было затем развиваться на их основе, пошли бы по пути применения однофазного тока». Очень неприятным обстоятельством являлась угроза большого штрафа в 51 тыс. марок, который должны были выплатить участники эксперимента в случае, если строительство электропередачи не удастся завершить к назначенному жесткому сроку.



Трехфазный синхронный генератор Чарльза Брауна

Работа закипела, все делалось в спешке, часто элементы технических устройств рисовались от руки и тотчас отдавались в производство. Времени на разработку документации просто не было. Интересен описанный Доливо-Добровольским эпизод одного из его частых посещений завода «Эрликон». Чарльз Браун показал ему проект только что сконструированного им трехфазного синхронного генератора. Михаилу Осиповичу очень понравился корпус генератора с массивной обмоткой. Вот его отзывы об этой машине: «Безусловно, эта низковольтная динамомашинка была исключительно красива ... ее размеры и потери были поразительно малы. Один взгляд на динамо мощностью 300 л. с., сконструированную для передачи электроэнергии из Лауфена моим другом Ч. Брауном, покажет вам, насколько малыми по размерам и рациональными можно было бы конструировать такие машины». Однако он указал и на 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. После оживленной дискуссии с Брауном Михаил Осипович обратился ко второму руководителю «Эрликона» Губеру с замечанием по этому поводу. Тот их отклонил, объяснив, что Браун является техническим руководителем фирмы. Недостаток был учтен в конструкции асинхронного двигателя. Падение напряжения



не позволяло запустить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 75 кВт. Именно такой двигатель, обладающий простой и надежной конструкцией, должен был показать достоинства трехфазного тока. Пришлось Доливо-Добровольскому пожертвовать своим детищем ради главной идеи трехфазной электропередачи. Он сделал ротор двигателя фазным. А это означало наличие щеток, контактных колец и пускового реостата. Из-за боязни потерь в стали конструкция двигателя была обращенной. Напряжение подводилось к ротору при помощи трех колец. Якорем служил 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 с треугольника на звезду. Таким образом, конструкция асинхронного двигателя получилась довольно сложной.

В качестве изолирующих материалов для высоковольтных трансформаторов применялись бумага, войлок и фланель, предварительно прокипяченные в масле. Трансформаторы заполняли специальным смоляным маслом с удельным весом больше еди-



Трехфазный асинхронный двигатель (100 л.с.)  
М.О. Доливо-Добровольского

ницы, так что случайно проникшая в него вода должна была выходить на поверхность. Трансформаторы после заполнения маслом прогревались в течение нескольких дней при температуре свыше 100 °С для устранения последних следов влажности. Несмотря на новизну дела, ни один из трансформаторов не имел случаев отказа изоляции или пробоев, даже при последующей работе на напряжении выше 30000 В.

В разгар работ Чарльз Браун объявил о своем скором уходе из фирмы «Эрликон» по причине создания со своим коллегой Вальтером Бовери собственного предприятия «Браун, Бовери и К<sup>о</sup>» (Brown, Boveri & Cie). Это сильно осложнило работу Доливо-Добровольского, на него легла дополнительная нагрузка.

Пока «АЕГ» и «Эрликон» напряженно трудились над производством новых машин, Миллеру приходилось решать весьма непростые проблемы. Распространялось мнение о смертельной опасности передачи электрической энергии столь высокого напряжения, которое еще никогда прежде не использовалось. С целью информации о грозящей опасности, предостережения от прикосновения к проводам, на каждой мачте ЛЭП был нарисован череп. В результате длительных переговоров Миллеру удалось убедить правительства земель Пруссии, Гессена, Бадена и Вюртемберга, через которые проходила линия электропередачи, оказать поддержку эксперименту. Самые большие трудности возникли с властями земли Баден, которые постоянно чинили препятствия в прокладке линии. Весьма курьезным было одно из предписаний этой администрации о сооружении вдоль линии с определенным интервалом специальных сторожек для наблюдения. Миллер называл их «шутовскими домиками». В целом на преодоление сопротивления и устранение многочисленных препятствий ушло столько времени, что даже речи не могло идти о том, чтобы осуществить дальнюю передачу к моменту открытия выставки.

Работы начались, наконец, только в середине июля 1891 г. Миллер планировал запустить линию к 15 августа – открытию Конгресса немецких городских управ. Миллер считал очень важным, чтобы участники Конгресса смогли воочию увидеть и оценить работу новой трехфазной системы токов, поскольку заказы на ее установку могли поступить именно от муниципалитетов. Строительством линии занимались Имперское почтовое ведомство и дирекция телеграфной службы Вюртемберга. Отвечал за прокладку линии советник Имперской почты Фридрих Эберт. При прокладке трехпроводной линии применялся медный провод диаметром 4 мм, который крепился на фарфоро-масляных

изоляторах. Опоры были деревянными с пролетом около 60 м. Туннели приходилось обходить и тянуть линию через горы. Большие проблемы возникли с изоляторами. Необходимо было использовать примерно 10000 изоляторов (по три на каждую мачту). Чарльз Браун предложил применять изоляторы с тремя маслоприемниками, которые он видел в Лондоне, наблюдая за успешными экспериментами Джона Суинберна. Миллер также видел их во время одной из своих поездок в Англию. Но удалось достать только третью часть необходимых изоляторов. Оставшиеся две трети линии пришлось комплектовать изоляторами меньшего размера с одним маслоприемником. Поэтому представлялось благоразумным пускать электропередачу на более низком напряжении в 15000 В.

Интересной деталью стала установка плавких предохранителей со стороны высокого напряжения. В начале линии, около здания электростанции в разрыв каждого провода был включен провод значительно меньшего сечения. Для отключения линии во Франкфурте посредством простого приспособления устраивалось трехфазное короткое замыкание. Плавкие вставки перегорали, турбина начинала разгоняться, и машинист, заметив это, останавливал ее. Затем в обесточенную линию включались телефоны и давались распоряжения персоналу станции о времени подачи напряжения.

Несмотря на проблемы, строительство линии было закончено всего через шесть недель. Незадолго до пуска Миллер получил телеграмму о том, что правительство земли Баден категорически отказывает в разрешении подключить линию на границе Бадена. Миллер вспоминает: «Я выехал туда еще ночью и весь день обходил линию с представителем правительства Бадена; каждая мелочь, к которой он придирался, немедленно исправлялась, но когда я вечером приехал в Эбербах с комиссией, он снова хотел воспрепятствовать подключению, так что мне ночью пришлось ехать к министру в Карлсруэ. Я так возмущался, что чуть не схлопотал три месяца тюрьмы за оскорбление должностного лица при исполнении служебных обязанностей». Для примирения сторон Миллер выставил бочонок вина.

В конечном итоге Миллеру удалось настоять на своем. В 8 ч вечера 24 августа линия протяженностью почти в 170 км была включена. Представители властей Вюртемберга собрались в Лауфене. В это время Доливо-Добровольский находился также вместе с Миллером в Эбербахе. Переполненный эмоциями Михаил Осипович поднялся на одну из вершин опор линии электропередачи. Оскар фон Миллер написал позже об этом историческом моменте: «... и когда Добровольский крикнул с мачты: электричество дошло до Франкфурта!... и причем

это электричество – из лучшего, трехкратно сопряженного переменного тока, подлинного трехфазного переменного!, в толпе, собравшейся у вокзала, началось буйное ликование, опять-таки подогретое бочонком вина». Михаил Осипович, чтобы убедить всех окончательно в безопасности электропередачи, провел опасный эксперимент. Когда подали напряжение, то специальным приспособлением оборвали провод, и он со снопом искр упал на железнодорожные рельсы. Доливо-Добровольский быстро подошел и поднял провод незащищенной рукой, будучи абсолютно уверенным в том, что сконструированная им защита надежна. Это происходило в присутствии делегатов от Бадена и Гессена, представителей имперской почты и журналистов. Несмотря на такой наглядный эксперимент, Миллер предпочел все же остаться в Эбербахе, опасаясь, что представители Бадена могут снова помешать осуществлению проекта. Доливо-Добровольский спешно выехал во Франкфурт.

25 августа 1891 г. ровно в полдень на территории выставки во Франкфурте впервые загорелись 1000 электроламп от электричества, переданного из Лауфена. Свет от ламп освещал вывеску, в центральной части которой значилось: **ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЛАУФЕН – ФРАНКФУРТ**. Ниже была указана протяженность линии – 175 км, а по бокам – наименования фирм, осуществивших эксперимент: «Эрликон» и «АЕГ». Станция для понижения напряжения находилась рядом, в павильоне «Передачи электроэнергии», там же размещался двигатель мощностью 100 л. с., напрямую подсоединенный к насосу. Кроме этого двигателя, демонстрировалось еще несколько небольших асинхронных двигателей, в том числе и двигатель мощностью 20 л. с., спроектированный Брауном. Вверху висела карта с трассой линии электропередачи, у стены внизу находились распределительные щиты, «которые по своему устройству были не сложнее, чем обычно используемые для трехпроводных систем постоянного тока».

На следующий день было проведено испытание главного асинхронного двигателя. Все оборудование хорошо работало. Доливо-Добровольский мог 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».

Важнейшим мероприятием выставки стал Международный конгресс электротехников 1891 г. во Франкфурте-на-Майне, который проходил с 7 по

12 сентября. На его открытии присутствовало около 700 чел., среди которых около 250 приехали из других стран. Конгресс собрал вместе ученых, инженеров, профессоров высшей школы, фабрикантов, банкиров, патентных поверенных, представителей официальных властей, советников по градостроительству, репортеров и писателей. Конгресс вызвал широкий интерес не только в профессиональных кругах, но и у общественности. В списке участников Конгресса можно было такие известные имена, как Марсель Депре и Эдуард Госпиталье из Парижа, Джон Гопкинсон, Гисберт Капп, Сильванус Томпсон из Лондона, Галилео Феррарис из Турина, Вернер фон Сименс из Берлина и др. Россия была представлена делегацией из 15 чел., среди которых профессор Александр Григорьевич Столетов, председатель IV (электротехнического) Отдела Императорского Русского Технического Общества Владимир Яковлевич Флоренсов и представитель Московского политехнического музея Альберт Христианович Репман.

На Конгрессе присутствовал и преподаватель Доливо-Добровольского Эразмус Киттлер из Дармштадта, который по окончании обучения и пригласил Михаила Осиповича на свою кафедру в качестве ассистента в 1884 г. Киттлеру было поручено возглавить проверочную комиссию по трехфазной электропередаче, и это было приятной новостью для команды Миллера. Американскую делегацию возглавлял вице-президент Американского института инженеров-электриков Карл Геринг из Филадельфии. Интересен такой факт: Геринг был также учеником Киттлера и также работал на его кафедре ассистентом, пока его место в 1884 г. не занял Доливо-Добровольский. Карл Геринг сделал за эти семь лет блестящую карьеру в США. Именно от него американский

профессиональный мир очень быстро узнал о событиях на Франкфуртской выставке.

Программа Конгресса включала общие заседания, заседания секций, посещения выставки с демонстрациями и деловые мероприятия. Круг специальных тем охватывал все области электротехники того времени, но техника токов высокого напряжения занимала первое место. Список докладов, представленных по этому направлению, был весьма разнообразен. Доливо-Добровольский также выступил с докладом «Передача энергии посредством переменных токов различных фаз (трехфазный ток)». Проф. Сильванус Томпсон так описывает этот момент: «...Весь интерес конгресса был сосредоточен на многофазном переменном токе, или как его запросто называют, «вращающемся токе». Доливо-Добровольский докладывал о своих работах над двигателями переменного тока и объяснил принцип действия своего двигателя вращающегося тока». Работая на стенде «AEG», Михаил Осипович демонстрировал принцип вращающихся магнитных полей на работающих моделях трехфазных асинхронных двигателей. Маленький двигатель с короткозамкнутым ротором приводил в действие вентилятор и сверло. Двигатель в 2 л. с. вращал вал динамомашины. В последний день Конгресса трехфазную линию пустили на полную мощность. Заработал большой трехфазный двигатель, который привел в движение 10-метровый водопад. Все лампы при этом горели. Это событие поразило умы современников. Простые посетители выставки были уверены в том, что вода р. Неккар таинственным образом прошла по проводам 170 км и текла теперь в водопаде во Франкфурте.

И опять случилось событие, грозившее крупными неприятностями команде Миллера. Помощник

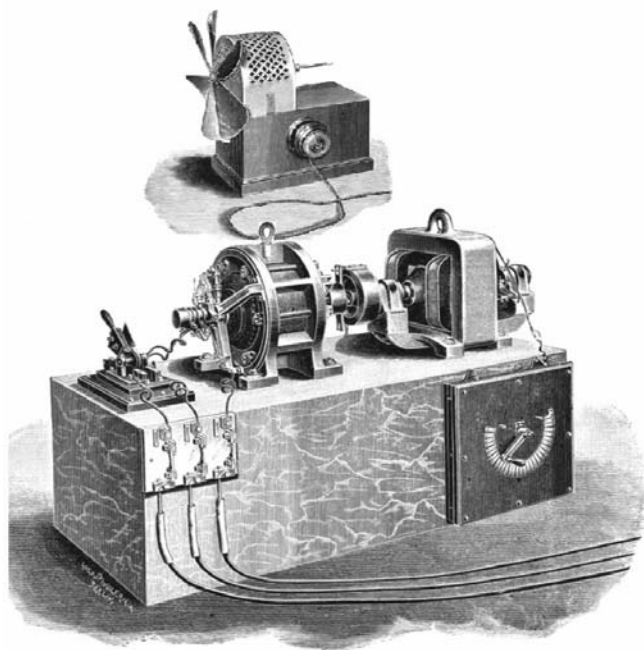


Эразмус Киттлер



Галилео Феррарис





Модели асинхронных двигателей Доливо-Добровольского

Браун доктор Гейм дежурил у приборной доски на Лауфенской электростанции. Он заметил внезапное понижение показаний вольтметра на 10–20%. Одновременно раздался звон телефонного аппарата, хотя он не был подключен к проводам. Этот звон и обратил на себя внимание. Немедленно турбина была выключена. Гейм бросился в трансформаторное здание и нашел там лежащим без чувств машиниста Рау. Реанимационные мероприятия не помогли. Рау так и не пришел в себя. Рука его была обожжена, следы копоты были видны на потолке. Расследование показало, что машинист прошел без разрешения в трансформаторное здание и стал прокладывать провод для освещения. Он влез на балку, проходящую на высоте около 2,5 м, и неосторожно коснулся высоковольтной линии. Руководство сделало все, чтобы это стало известно как можно позднее, иначе трехфазную высоковольтную электропередачу могли запретить. О произошедшем несчастном случае газеты написали только в ноябре 1891 г.

Заключительным мероприятием Конгресса стало посещение электростанции в Лауфене. «AEG» и «Эрликон» пригласили около 100 ч. Этот факт нашел отражение в групповой фотографии. На фоне электростанции трехфазного тока стоят великие электротехники того времени, многие фамилии которых упоминались в этой статье: Эмиль Ратенау, Марсель Депре, Гисберт Капп, Джон Гопкинсон, Чарльз Браун, Петер Губер, Фридрих Эберт. К сожалению, по непонятной причине на фото нет Доливо-Добровольского. Будем, однако, считать, что



Искусственный водопад, приводящийся в действие асинхронным двигателем Доливо-Добровольского

Михаил Осипович, как и автор снимка Оскар фон-Миллер, незримо присутствуют среди выдающихся ученых-электротехников.

Международная проверочная комиссия начала испытания трехфазной системы еще до окончания выставки. Первоначальный план предполагал проведение измерений, «позволяющих составить представление о мощности и технических характеристиках новых двигателей трехфазного тока». Но из-за нехватки времени было принято решение эти эксперименты «отставить в сторону», «поскольку впоследствии их можно осуществить где-либо без использования дальней передачи». Времени было мало потому, что электростанция в Лауфене 5 ноября должна была перейти в собственность г. Хайльбронн. Окончательный план предполагал определение КПД гидротурбины, генератора Брауна, трансформаторов и самой трехфазной электропередачи. В качестве нагрузки использовали электрические лампы с максимальной мощностью 110 кВт.

Был опубликован «Отчет о работе проверочной комиссии», в котором основные выводы говорят о большом успехе проекта:

1. Максимальный КПД электропередачи (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) составил 75,2 %, линейное напряжение 15000 В.



Посещение электростанции в Лауфене участниками Международного конгресса электротехников

2. Единственным видом потерь при передаче энергии по высоковольтной линии являлись потери, вызванные омическим сопротивлением.

3. Теоретические расчеты показали, что влияние мощности на КПД при передаче энергии по длинным оголенным воздушным проводам крайне мало при использованной частоте и при планировании линий электропередачи может рассматриваться как второстепенное.

4. Электроснабжение от переменных токов высокого напряжения на расстоянии более 100 км оказалось таким же надежным, как и при использовании проводящих линий длиной несколько метров и напряжением в несколько сотен вольт.

Динамо-машина трехфазного тока Чарльза Брауна показала по документам проверочной комиссии КПД, равный 93,5%; нагрузка составляла 190 л. с.; КПД трансформаторов был равен 96%.

До передачи городу электростанции оставалось несколько дней, и было решено провести дополнительные испытания на напряжении выше 25000 В. Это уже были неофициальные испытания. К работе первой комиссии заинтересованные лица не допускались. В состав испытателей вошли от «АЕГ» Доливо-Добровольский, от «Эрликона» — инженер Хельдер. Возглавляли комиссию Киттлер и Линдлей. В числе ассистентов Линдлея был Роберт Эдуардович Классон, который позже, в 1896 г., построит одну из первых электростанций трёхфазного тока на Охтинских пороховых заводах под Петербургом, а через много лет станет соавтором плана ГОЭЛРО. Работу второй комиссии преследовали неудачи. В первый же день испытаний 2 ноября

Вютенбергская дирекция связи потребовала прекратить эксперименты из-за, якобы, больших помех в телефонной линии Лауфен—Хайльбронн, возникающих по причине индуктивного влияния. Опять Миллеру пришлось использовать свой административный ресурс. Кому он звонил и как убеждал осталось тайной, но испытания в результате разрешили. Начались первые опыты на линейном напряжении 25000—30000 кВ. Для предосторожности понижали частоту с 40 до 24 периодов. В этот момент были пробиты два изолятора и поврежден столб. Пока его ремонтировали, время вышло. Единственный результат этих экспериментов: «при полезной мощности в 180 л. с. КПД электропередачи составил примерно 75%».

Известие об успехе трехфазной электропередачи мгновенно распространилось в международных профессиональных кругах. Великий немецкий физик Герман фон Гельмгольц так прокомментировал это событие: «Начало положено. Мы видим, что еще многого можно достичь, и существенная заслуга огромной национально-экономической важности состоит в том, что доказательство представлено на выставке». Обещания участников проекта оправдались, те, кто прогнозировал катастрофу удачно проведенному эксперименту, замолчали. Не только профессиональные журналы, но и ежедневные газеты подробно писали об успешной передаче электроэнергии. Немецкий журнал «Die Gegenwart» подчеркивал эпохальное значение события: «Это следует считать самым выдающимся явлением культурного прогресса не в меньшей степени, чем изобретение паровых машин и локомотивов, откры-



тие Суэцкого канала и прокладка первого трансатлантического кабеля между Европой и Америкой... Электричество произведет социально-экономическую революцию в конце XIX – начале XX вв.».

Корреспондент лондонской «Таймс» сообщал: «Я нисколько не преувеличиваю, выразив мнение, что передача электрической энергии из Лауфена во Франкфурт стала труднейшим и важнейшим экспериментом в технике электричества с тех пор, как эта таинственная сила природы была поставлена на службу человеку». Российский журнал «Электричество» в первом номере за 1892 г., анализируя успехи мировой электротехники предыдущего года, писал: «Франкфуртская выставка, объединив в одном целом все успехи электротехники за прошлые годы, указала на еще неразведанные области этой науки, выставила ярче то, что требовало совершенствования, и осветила пути к этому совершенствованию... Минувший год навсегда останется памятным в истории электротехники; с ним всегда будет связано воспоминание о Франкфуртской выставке и о грандиозном опыте передачи силы Лауфена с применением разновидности переменных токов, которым и, может быть, суждено заменить во многих случаях токи постоянные и токи переменные.»

Значение выставки во Франкфурте состоит в том, что она оказала огромное влияние на общественное мнение. Современники оценили Франкфуртскую выставку как решительно поворотный момент в истории электроснабжения: электротехника превращается в ведущую технологию. С точки зрения «системного спора» результат был следующий: фирмы, использующие переменный ток, вышли победителями. И, наоборот, компании, применяющие только постоянный ток, стали срочно приобретать лицензии на технологии переменного тока.

Эмиль Ратенау обобщил успех электропередачи на столь значительное расстояние: «Новейшие достижения позволяют нам строить великолепные центры выработки электрической энергии в любом месте – в горах и на морском берегу, чтобы использовать энергию горных потоков и приливов, а также у крупнейших речных порогов, чтобы превращать их до сих пор бесцельно растрчиваемую силу в полезное электричество, транспортировать его на любые расстояния и там распределять и использовать любым способом».

Основным достижением выставки, несомненно, стала передача трехфазного тока от электростанции Лауфен к Франкфурту-на-Майне. Российский журнал «Электричество» очень точно написал о главном достоинстве демонстрации трехфазного тока: «...Система Доливо-Добровольского тем более интересна, что она единственная из всех, которая пока выдержала самое строгое испытание, именно

испытание практического выполнения ее в больших масштабах». Нельзя сказать, что триумф трехфазной электропередачи в один миг привел к ее абсолютному признанию. Но именно с этого момента широкое применение системы трехфазных токов, основным потребителем которой станет трехфазный асинхронный двигатель, было лишь вопросом времени. Пройдет один-два десятка лет и эта система будет ведущей в мировой электротехнике. Приведем цитату доклада М.О. Доливо-Добровольского, предназначавшегося для Союза электротехников Берлина в 1889 г. и не разрешенного руководством «АЕГ» к прочтению из-за опасений за свой бизнес, основанный в то время на постоянном токе. Тогда Михаил Осипович смотрел в корень: «Электродвигатели переменного тока не только возможны, но, наоборот, именно там, где нужны электродвигатели, будет применяться предпочтительно переменный ток»,

Точку в работе Франкфуртской выставки поставил подробный двухтомный «Официальный отчет», во всех деталях отразивший организацию, работу и освещение в прессе. «Официальный отчет» появился с почти трехлетней задержкой. Это было связано с тем, что даже после завершения выставки многочисленные эксперименты на представленном оборудовании продолжались. Выпуск отчета затягивала и закулисная борьба вокруг результатов испытаний: заинтересованные фирмы пытались задним числом исправить негативные выводы комиссий.

Миллеру выставка принесла большой успех. При организации выставки и особенно при осуществлении трехфазной электропередачи он поставил своей команде сверхзадачи и успешно решал их, преодолев колоссальные трудности и показав талант организатора. В глазах европейских специалистов Миллер был признан беспристрастным экспертом. «Техническое бюро Оскара фон Миллера» начало получать муниципальные заказы от городов Германии. Но постепенно он стал отходить в своей деятельности от профессии электротехника, инженера и посвятил жизнь музейному делу. На протяжении многих лет он создавал Немецкий музей в Мюнхене, который и сейчас является самым крупным музеем техники в мире. В музее есть зал, посвященный Лауфен-Франкфуртской электропередаче, где бережно сохранены ее основные элементы: генератор, трансформаторы, мачта с изоляторами, асинхронные двигатели.

**БОРОДИН Д.А., БОРОДИН В.Д.**

*P.S.* Как и планировалось, в начале 1892 г., открылась электростанция в Лауфене мощностью в

330 л. с., снабжающая г. Хайльбронн трехфазным током. Это было первое практическое применение трехфазной системы в истории. Тем более интересен факт, что даже после такого удачного практического примера электрофикаторы Франкфурта-на-Майне долго не могли определиться с системой электроснабжения города. Потребовалось еще почти два года непрерывных дебатов, пока в тяжелой борьбе с конкурентами этот проект не выиграл Чарльз Браун со своим недавно созданным предприятием «Brown, Boveri & Cie». Проект Брауна был прост и не отличался высокой стоимостью, при этом его фирма сразу же предлагала управление будущей Франкфуртской электростанцией и электросетями. Однако электрификация Франкфурта-на-Майне была выполнена на однофазном переменном токе.

При написании статьи использована литература: **Электричество**, 1890, № 2–6, 8–10, 19; 1891, № 1, 5, 7, 9–16, 19–22; 1892, № 1, 3, 13, 14, 20; **Доливо-Добровольский М.О.** Избранные труды (о трехфазном токе). – М. – Л. Госэнергоиздат, 1948; **Веселовский О.Н.** Михаил Осипович Доливо-Добровольский. – М.: Госэнергоиздат, 1958; **Белькинд Л.Д., Веселовский О.И., Конфедеров И.Я., Шнейберг Я.А.** История энергетической техники/Перераб. – М.: Госэнергоиздат, 1960; **Шнейберг Я.А.** Титаны электротехники: очерки жизни и творчества. – М.: Изд-во МЭИ, 2004; **Füßl Wilhelm.** Oskar von Miller: 1855–1934, eine Biographie. – München: Beck, 2005; **Neidhöfer Gerhard.** Michael von Dolivo-Dobrowolsky und der Drehstrom. – Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung Geschichte der Elektrotechnik, Bd.19, 2, veränd. Aufl. 2008; **Offizieller Bericht über die Internationale elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main, 1891.** Herausgegeben vom Vorstand der Ausstellung. – Frankfurt a.M.: J.D. Sauerländer, 1893–94.