

# Из истории электротехники

*Электричество, 2016, № 12, с. 50–53.*

*Уходящий год отмечен знаменательной датой в истории мировой электроэнергетики. 125 лет назад, в 1891 г., на Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне впервые была успешно продемонстрирована электропередача на трехфазном токе.*

*Редакция представляет читателям статью известного историка науки, к.т.н. О.Н. Веселовского, опубликованную в нашем журнале в 1966 г. (№ 12) и посвященную 75-летию этого революционного события<sup>1</sup>.*

## Юбилей электропередачи трехфазным током

**Канд. техн. наук О.Н. ВЕСЕЛОВСКИЙ**

В истории любой отрасли науки и техники имеются события и даты, которые не забываются, значимость которых весьма велика, и каждое новое поколение, оглядываясь назад, с благодарностью вспоминает труды и заслуги своих выдающихся предшественников.

В одной из своих статей Михаил Осипович Доливо-Добровольский справедливо заметил, что 1891 г. — год Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне — «должно считать, так сказать, годом рождения трехфазного тока» [Л. 1]. На этой выставке впервые были широко продемонстрированы трехфазные электрические машины и аппараты и, как в этой же статье писал изобретатель, «было продемонстрировано при передаче из Лауфена во Франкфурт главное достоинство трехфазного тока, а именно его применимость для передачи энергии на большие расстояния при высоких напряжениях с применением трансформаторов».

И хотя Феррарис и Тесла проводили первые опыты с устройствами, использующими явление вращающегося магнитного поля, еще в середине 1980-х годов, хотя первые демонстрации трехфазных машин М.О. Доливо-Добровольского состоялись в 1889 г., действительным годом рождения трехфазного тока считается 1891 г. Этот год явился той границей, которая отделила эпоху электрификации от периода, когда электротехника существовала как «прикладное учение об электричестве».

1980-е годы в истории техники известны как годы борьбы сторонников постоянного и различных систем переменных токов, годы так называемых «трансформаторных битв». Симпатии подав-

ляющего большинства электриков, во главе которых находился знаменитый Эдисон, были на стороне изученного и привычного постоянного тока.

В теоретических исследованиях цепей переменного тока встречалось много путаных рассуждений, излишне громоздких математических выражений и прямых ошибок, отталкивавших специалистов не только от этих работ, но и от самого переменного тока. Интересно привести еще одно свидетельство Доливо-Добровольского, который, вспоминая по случаю 25-летия выставки во Франкфурте 1880-е годы, писал: «Таким образом случилось, что даже в среде специалистов по переменному току образовалось два лагеря: теоретиков, которые все критиковали, но не вносили ничего нового, и чистых практиков, способных лишь вносить немногие усовершенствования... При этом сторонники постоянного тока коварно и злорадно ухмылялись, подсчитывая годовые потери в трансформаторах при холостом ходе и указывая различные призраки, как-то: сдвиг фаз, самоиндукция и тому подобные ужасные и отталкивающие вещи. Если этого оказывалось недостаточно, то переходили к прямым интригам против проведения еретических лекций в пользу ненавистного рода тока. Об этом я мог бы порассказать!».

Сама мысль об организации в 1891 г. Международной электротехнической выставки явилась плодом разгоравшейся и не находившей решения полемики между специалистами. Во Франкфурте-на-Майне в конце 80-х годов было решено построить центральную электростанцию, однако не только бургомистр и его советники, но и комиссия из авторитетнейших электриков (Феррарис, Киттлер, Уппенборн и др.) не могли прийти к соглашению о роде тока. Тогда-то и было принято решение устроить в городе Международную выставку,

<sup>1</sup> Более подробный материал на эту тему помещен в «Электричестве», № 1 и 2, 2012 г. в статье Бородина Д.А. и Бородина В.Д.

предложив всем фирмам и изобретателям показать свои успехи. Международная комиссия во главе с Г. Гельмгольцем, испытав установки и системы экспонентов, должна была дать ответ на вопрос о выборе рода тока.

К 1891 г. было уже ясно, что на повестку дня встала комплексная задача электрификации промышленности, решение которой затрагивало как проблемы электропривода и электроосвещения, так и проблему электропередачи. И если первые две проблемы могли быть решены на базе техники постоянного тока, то передача энергии на сколько-нибудь значительные расстояния требовала существенного повышения напряжения; в последнем отношении преимущества были на стороне техники переменного тока, располагавшей трансформаторами.

На Международной выставке несколько фирм построили линии электропередачи длиной около 4 км, используя различные системы постоянного и переменного (однофазного) токов. Одна франкфуртская фирма построила линии переменного тока протяженностью 10 км (Оффенбах—Франкфурт). Однако гвоздем выставки явился невиданный по своим масштабам и эпохальный по значению эксперимент, центральной частью которого была 170-километровая линия электропередачи трехфазным током Лауфен—Франкфурт. Вся установка была сооружена при руководящем участии М.О. Доливо-Добровольского и отразила результаты его основополагающих работ в новой области электротехники.

Краткая история сооружения и испытаний этой установки такова.

Технический руководитель выставки, прогрессивный немецкий инженер Оскар фон Миллер, знавший о работах М.О. Доливо-Добровольского, предложил построить электропередачу Лауфен—Франкфурт, используя новую трехфазную систему. Следует отдать должное смелости и решительности Миллера, существенно способствовавшего решению проблемы передачи энергии на большие расстояния. Дело в том, что именно по его предложению в 1882 г. Марсель Депре осуществил ту передачу энергии постоянным током из Мисбах в Мюнхен (57 км). Теперь при подготовке Франкфуртской выставки, Миллер совместно с Доливо-Добровольским рискнул сделать следующий шаг. О размере риска можно судить по тому, что к моменту принятия решения (июль 1890 г.) не только расстояние в 170 км представлялось невероятно большим, но и сама техника трехфазного тока находилась в зародышевом состоянии: были построены опытные экземпляры машин и трансформаторов мощностью в несколько сотен ватт. Любопыт-

но отметить, что патентные заявки на двигатель с фазным ротором Доливо-Добровольский сделал только в декабре 1890 г.; в это время у изобретателя работал опытный двигатель с кольцами мощностью около 4 кВт, а для выставки он уже решил изготовить двигатель в 100 л. с.! Сроки были настолько сжатыми, что изобретателю и его сотрудникам приходилось многие серьезные вопросы решать буквально «на ходу», придумывая некоторые конструкции и схемы в течение одного-двух часов.

Доливо-Добровольский отчетливо представлял себе трудности в решении поставленной задачи и смело связал свою репутацию с успехом предпринятого эксперимента. «Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмыслимого позора и подвергнуть его недоверию, которое вряд ли удалось бы потом быстро рассеять, — писал он впоследствии, — 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».

В январе 1891 г. во дворе одного из швейцарских заводов был проведен предварительный опыт, в котором исследовалась принципиальная возможность сооружения высоковольтной линии переменного тока. Двухпроводная линия длиной 3 км была натянута в несколько рядов, а рядом проложили телефонную линию. Испытания велись при напряжениях 15, 20, 30 и 33 кВ, причем при каждом напряжении определялось расстояние между проводами, при котором происходил разряд, производились короткие замыкания, проверялось действие защиты, имитировался дождь, создавались самые наихудшие условия, испытывались различные конструкции фарфоровых изоляторов и исследовалось влияние линии сильного тока на телефонную линию. Все испытания дали положительный результат и убедили в возможности построить линию переменного тока Лауфен—Франкфурт.

Сооружение электропередачи развернулось широким фронтом; электрические машины, трансформаторы, приборы изготовлялись одновременно с установкой опор и строительными работами на выставочной площадке. Одна из турбин (мощностью 304 л.с.) гидросиловой установки завода портландского центра в Лауфене (на р. Неккар) была выделена в распоряжение строителей электропередачи. Вал турбины соединили с валом трехфазного генератора, изготовленного швейцарским заводом Эрликон. В закрытом помещении был установлен щит с измерительными приборами и токовыми реле, а также трехфазные масляные трансформаторы.

Несмотря на то, что предварительные опыты показали принципиальную возможность надежной работы электропередачи при напряжениях порядка 30 кВ, руководители фирм, соорудивших линию Лауфен—Франкфурт, все же не решились пойти на риск применения столь высокого напряжения и согласились, хотя бы на начальной стадии, применить напряжение не выше 15 кВ. Однако, поскольку Доливо-Добровольский и другие инженеры настаивали на проведении опытов передачи энергии при напряжении 30 кВ, было решено изготовить дополнительно несколько трансформаторов с тем, чтобы впоследствии включить на каждом конце линии по два трансформатора. При последовательном соединении обмоток высшего напряжения трансформаторов можно было удвоить напряжение электропередачи.

3182 деревянные опоры высотой 8 и 10 м со средним пролетом 60 м поддерживали трехпроводную линию длиной 170 км. Изоляция проводов осуществлялась при помощи штыревых форфор-масляных изоляторов. Никаких выключателей на линии не было. Генератор и трансформатор соединялись в блок. Для того чтобы в случае необходимости можно было быстро отключить линию, был предусмотрен ослабленный участок, представлявший собой три плавкие вставки длиной 2,5 м. Каждая плавкая вставка состояла из двух медных проволок диаметром 0,15 мм и включалась между двумя специальными опорами в рассечку каждого провода линии передачи. Для удобства обслуживающего персонала, которому приходилось заменять сгоревшие вставки, на опорах была устроена площадка, к которой вела лестница.

Во Франкфурте и в других пунктах на трассе линии были установлены «угловые замыкатели» — металлические брусья, которые можно было при помощи шнура опускать на провода линии. При коротком замыкании линии, произведенном при помощи бруса, перегорали плавкие вставки в Лауфене, турбина, оказавшись разгруженной, развивала большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее. Линия обесточивалась, в нее включался телефон, и персонал по телефону узнавал о причине отключения и о времени нового включения линии.

На выставке, в специальном павильоне, были установлены понижающие трансформаторы, работавшие на ламповую нагрузку. От отдельного трансформатора питался электродвигатель Доливо-Добровольского мощностью около 75 кВт (100 л.с.). Последний приводил в действие водяной насос декоративного десятиметрового водопада.

25 августа на выставке зажглись 1000 ламп, питаемых энергией лауфенской гидростанции, а

12 сентября заработал искусственный водопад. Несмотря на невероятную спешку при изготовлении элементов электропередачи, вся установка, включенная без предварительных испытаний, работала хорошо и достаточно надежно. В дополнение к сказанному выше о смелости устроителей электропередачи можно привести еще такую существенную деталь: электродвигатель невиданной до тех пор мощности изготовлялся в Берлине, генератор — в Швейцарии, установлены они были, соответственно, во Франкфурте и в Лауфене, и двигатель впервые был включен прямо на выставке в присутствии посетителей и корреспондентов. Испытать двигатель до этого не представлялось возможным, так как другого источника трехфазного напряжения соответствующей мощности ни в Берлине, ни во Франкфурте, ни где-либо еще не было!

Многочисленные участники и посетители международной выставки восторженно приветствовали автора трехфазной системы и инициаторов смелого эксперимента. Среди непосвященной части публики распространилось мнение, что в искусственном водопаде журчит «настоящая вода из Неккара», передаваемая во Франкфурт по проводам. Действительное же значение этой электропередачи в 1891 г., пожалуй, и невозможно было полностью оценить: это сделала история.

Представляют интерес испытания, которым была подвергнута линия электропередачи.

Подробные сведения о работе международной испытательной комиссии (от России в работе комиссии принимал участие молодой инженер Р.Э. Классон) мы находим в двухтомном официальном отчете, значительная часть которого посвящена испытаниям электропередачи Лауфен—Франкфурт.

Члены комиссии находились как на электростанции, так и на выставке, а также в некоторых промежуточных пунктах линии. О тщательности испытаний может свидетельствовать попытка учесть потери в соединительных проводах измерительных приборов. В течение нескольких дней проводились серии опытов продолжительностью примерно 10 мин, в которых задавались различные режимы работы и производились многочисленные измерения. Главный результат, который всех волновал и которого с нетерпением ждали электрики, касался коэффициента полезного действия; измерения показали, что общий электрический КПД всей установки (включая генератор и трансформаторы) составлял от 68,5 до 75,2 % и, как правило, был близок к 75 %. Это был безусловно хороший результат для опытной установки, особенно если учесть, что напряжение составляло всего около 15 кВ. Заключительный вывод комиссии был следую-

---

ший: «... работа линии с переменными токами напряжением от 7500 до 8500 В (фазное — *О.В.*), изолированной маслом, фарфором и воздухом, длиной больше ста километров, протекала всегда равномерно, безопасно и без нарушений, как и работа с переменными токами напряжением в несколько сотен вольт и при длине линии в несколько метров».

После того как были завершены основные испытания, были включены в работу новые трансформаторы и напряжение в линии поднялось до 28,3 кВ. К сожалению, полного объема испытаний линии при повышенном напряжении выполнить не удалось из-за возражений дирекции связи, поскольку электропередача оказывала заметное влияние на работу телефонной линии.

Тем не менее проведенные испытания показали дальнейшее увеличение коэффициента полезного действия, который при повышенном напряжении составил 78,9%.

Международную электротехническую выставку, работавшую в период с 16 мая по 19 октября 1891 г., посетили 1200000 чел. Большая часть посетителей побывала в павильоне Лауфен—Франкфуртской передачи. Даже после закрытия выставки в Лауфен и во Франкфурт все еще приезжали ученые, инженеры и целые делегации из близких городов и даже из-за границы, для того чтобы осмотреть устройства знаменитой электропередачи. Технические журналы всего мира систематически информировали своих читателей о ходе строительства и работе линии передачи, посвящали ей обзорные статьи. Например, в журнале «Электричество» были помещены несколько такого рода сообщений (№ 11, 12, 20 за 1891 г., № 1, 3, 13, 14 и др. за 1892 г.).

Результаты Лауфен—Франкфуртской электропередачи принесли мировую славу М.О. Доливо-Добровольскому и его соратникам, а трехфазному току открыли широкий путь в промышленность.

## АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (АЭН РФ)

извещает об общем собрании членов АЭН РФ 16 февраля 2017 г. и открывающихся вакансиях действительных членов и членов-корреспондентов Академии по следующим научно-отраслевым отделениям:

№ п/п	Наименование научно-отраслевых отделений АЭН РФ	Число вакансий	
		действительные члены	члены-корреспонденты
1.	Теоретическая электротехника	3	—
2.	Электроэнергетика	2	2
3.	Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности	3	5
4.	Электротехнические системы и устройства общего и специального назначения (в строительстве, горном деле, сельском хозяйстве и социальной сфере)	3	1
5.	Электротехнические системы транспорта и космической техники	1	5
6.	Электротехнология	2	1
7.	Средства и системы контроля, управления и автоматизации	2	3
8.	Электротехнические материалы и изделия	—	2
9.	Электрофизические и сверхпроводящие устройства	3	4
10.	Высоковольтная электротехническая и электронная аппаратура. Электромагнитные излучения, совместимость и экология	3	1
11.	Электроника и вычислительная техника	—	2
12.	Телекоммуникационные и информационные сети и системы	—	—
13.	Стандартизация и сертификация в электротехнике	—	—
14.	Электротехника и электроника в медицине	2	1
15.	Высшее электротехническое образование	—	—

Действительными членами Академии электротехнических наук РФ согласно уставу Академии избираются ученые, обогатившие науку выдающимися достижениями и открытиями, широко признанными и используемыми в научно-практической деятельности.

Членами-корреспондентами Академии электротехнических наук РФ согласно уставу Академии избираются ученые и специалисты, внесшие признанный вклад в развитие электротехнической науки.

Выдвигать кандидатов в действительные члены и члены корреспонденты могут научные учреждения, высшие учебные заведения, государственные, общественные и другие организации, а также действительные члены и члены-корреспонденты АЭН РФ по указанным в данной публикации научно-отраслевым отделениям.

В случае представления кандидатов научными учреждениями, высшими учебными заведениями, государственными, общественными и другими организациями выдвижение производится на заседаниях ученых и научно-технических советов, коллегий или президиумов путем голосования простым большинством голосов.

Представления на кандидатов в действительные члены и члены-корреспонденты АЭН РФ с соответствующей мотивировкой и приложением необходимых документов направляются в адрес Президиума Академии в течение месяца со дня настоящей публикации.

Необходимо представить в 1 экземпляре (в скоросшивателе) следующие документы: 1) заявление об участии в конкурсе; 2) письмо-представление организации с выпиской из решения НТС (Ученого совета) государственных, общественных и других организаций с результатами голосования, подписанной председателем и ученым секретарем НТС (Ученого совета), или представление на соискателя от членов Академии электротехнических наук РФ с соответствующей мотивировкой; 3) личный листок по учету кадров; 4) автобиография; 5) заверенный список научных трудов; 6) копии дипломов: об окончании вуза, доктора наук; аттестат профессора; 7) отзыв о научно-производственной и общественной деятельности кандидата с основного места работы; 8) личная научная программа (объемом не более двух страниц); 9) три фотографии размером 3×4.

Материалы направлять по почтовому адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14, Президиум Академии электротехнических наук РФ. Конт. тел. 8(499) 670 9663.

*Президент АЭН РФ, член-корреспондент РАН П.А. Бутырин.*