

Этот «гадкий утенок» — переменный ток

Ю.В. Черников

(Окончание. Начало см. ЭП, № 10–11, 2009 г.)

Устраняя существенный недостаток системы переменного тока, касающийся учета потребляемой электроэнергии, Оливер Блекбурн Шалленбергер, главный инженер фирмы Westinghouse, изобрел в начале 1888 г. индуктивный счетчик ампер-часов переменного тока, при конструировании которого он использовал эффект вращающегося магнитного поля [8]. Коммерческий выпуск этого счетчика начался в августе 1888 г., и он широко использовался в течение десяти лет для учета количества электроэнергии, которую потребляли осветительные нагрузки. Следует отметить, что в счетчике ампер-часов Шалленбергера отсутствовала обмотка, подключаемая к тем точкам цепи, между которыми измеряется потребляемая электроэнергия, поэтому он не подходил для работы с электродвигателями. В 1889 г. уже упоминавшийся выше венгерский инженер Блати, сотрудник завода «ГАНЦ» в Будапеште, запатентовал свой «Электрический счетчик для переменных токов» в Германии и США, который уже не имел указанного недостатка.

Как было сказано выше, другой крупный недостаток первых систем переменного тока заключался в отсутствии практически работоспособного электродвигателя. Именно этот недостаток часто упоминали сторонники постоянного тока во время дебатов 1888 г. 16 мая 1888 г. Тесла выступил на заседании Американского института инженеров-электриков с докладом, в котором подробно изложил принципы запатентованной им системы многофазных электрических машин. Доклад, перепечатанный

большинством ведущих электротехнических журналов, убедил многих специалистов в возможности создания практического электродвигателя переменного тока в ближайшем будущем. Вестингауз практически сразу вступил с Тесла в переговоры о приобретении патентов. К июлю 1888 г. он купил эти патенты у Теслы за 1 млн. долл., а также сумел получить согласие изобретателя на участие в работах по созданию многофазной системы электрических машин.

Сообщение о разработке фирмой Westinghouse счетчика ампер-часов переменного тока и осознание потенциального значения идей Теслы вынудили сторонников систем постоянного тока сконцентрировать внимание спорящих сторон на проблеме безопасности переменного тока и игнорировать все остальные проблемы.

В этом вопросе среди сторонников Эдисона выделялся инженер-электрик Гарольд Браун. Он называл себя «независимым» экспертом и утверждал, что не встречался с Эдисоном и не находился в контакте с какой-либо из эдисоновских фирм до своего вступления в конкурентную войну. 5 июня 1888 г. в нью-йоркской газете «Evening Post» он опубликовал открытое письмо, в котором заклеил переменный ток как источник смертельной опасности, причем низкое напряжение постоянного тока, подобное используемому фирмой Эдисона для осветительных ламп накаливания, он назвал «совершенно безопасным для жизни человека». Пытаясь доказать смертельную опасность переменного тока, Браун 30 июля 1888 г. провел публичную демонстрацию воздействия на собак переменного и постоянного токов. Демонстрация проходила в переполненном зале Колумбийской минной

школы. По данным Брауна, для смертельного поражения собаки величина постоянного напряжения должна составлять как минимум 1000 В, а в случае переменного напряжения достаточно 200 В. В 1889 г. Эдисон лично вступил в дискуссию, опубликовав в журнале North American Review статью с нападениями на переменный ток за его большую опасность для жизни людей. Эта статья была перепечатана многими журналами. Эдисон заявил, что он хотел бы ввести ограничение величины переменного напряжения максимум в 300 В. Следует отметить, что при этом исчезло бы основное преимущество переменного тока — возможность применения высокого напряжения в линиях передачи электроэнергии.

В конце 80-х годов XIX столетия в штате Нью-Йорк начался пересмотр способа осуществления смертной казни. До этого смертная казнь осуществлялась через повешение. Из-за нескольких неудач при проведении таких казней было решено прибегнуть к новому способу, а именно, к использованию электричества. Убедительная демонстрация Брауна и заключение Эдисона о гораздо большей опасности переменного тока по сравнению с постоянным обусловили решение штата Нью-Йорк об использовании переменного тока для проведения смертной казни. 6 августа 1890 г. в нью-йоркской тюрьме «Обзэрн» была осуществлена первая легальная смертная казнь на электрическом стуле с помощью генератора переменного тока. Смертные казни с применением переменного тока продолжались, но защитникам постоянного тока так и не удалось задержать процесс расширения сети электростанций переменного тока. Этому процессу способствовало, с



одной стороны, появление усовершенствованных трансформаторов и электродвигателей, а с другой стороны, существование жизненно важной потребности в передаче электроэнергии на большие расстояния.

После лета 1890 г. в конкурентной борьбе между двумя системами инициативой почти полностью завладел переменный ток. В 1892 г. фирма Westinghouse начала успешные поставки электродвигателя Теслы. В это же время проектировщики гидроэлектростанции на Ниагарском водопаде (самой крупной из всех строившихся) приняли решение применить переменный ток для передачи электроэнергии в г. Буффало, находящийся на расстоянии около 32 км. В октябре 1893 г. Вестингауз заключил контракт на изготовление генераторов переменного напряжения и трансформаторов для этой гидроэлектростанции. Другим важным достижением Вестингауза явилось заключение контракта по обеспечению освещения с помощью переменного тока на Чикагской всемирной выставке 1893 г.

Когда в 1895 г. электростанция на Ниагарском водопаде начала успешно вырабатывать электроэнергию переменного тока, дискуссия прекратилась.

В эти же восьмидесятые годы XIX столетия во Франкфурте-на-Майне решался вопрос о сооружении центральной электростанции. Различные германские и иностранные фирмы предлагали городским властям многие варианты проектов, предусматривающих применение либо постоянного, либо переменного тока. Для решения вопроса, какой именно использовать ток, была создана авторитетная комиссия, которую возглавил Феррарис. Однако комиссия не пришла к соглашению и не выдала определенной рекомендации.

Для решения этого вопроса нашли целесообразным устроить в 1891 г. во Франкфурте международную электротехническую выставку. Было обусловлено, что каждый экспонент будет иметь возможность подвергнуть свои экспонаты тщательной экспертизе. Была создана международная испытательная комиссия, которую возглавил маститый немецкий

ученый Герман Гельмгольц. Предполагалось, что результаты работы испытательной комиссии дадут ответ на вопрос о выборе рода тока.

В начале 1890 г. был образован выставочный комитет под председательством Леопольда Зоннемана; техническим руководителем комитета стал талантливый немецкий инженер Оскар фон Миллер, неутомимым заботам которого Франкфуртская выставка в значительной степени обязана своими масштабами.

28 апреля 1890 г. Миллер выступил на расширенном заседании комитета и рассказал о том, как он видит главную цель выставки: «Прежние электрические выставки в Мюнхене (1882 г.) и Вене (1883 г.) имели целью привлечь симпатии к электрическому освещению...».

Задачей Франкфуртской выставки должна стать демонстрация передачи и распределения электрической энергии в различных системах и применений» [1].

Очень быстро было достигнуто соглашение о передаче электроэнергии во Франкфурт из Пальменгартена, удаленного от выставки на 3,5 км. Фирмы «Гелиос», «Шуккерт», «Сименс» и электротехническая фирма в Аахене взялись продемонстрировать свои системы передачи постоянным и переменным токами. Все эти линии и были построены к открытию выставки.

Однако Миллера эти скромные по масштабам экспериментальные линии не вполне удовлетворяли. Незадолго до приглашения Миллера для технического руководства Франкфуртской выставкой ему было поручено построить центральную электростанцию постоянного тока мощностью 200 кВт в местечке Лауфен для электроснабжения города Хейльбронна, который находился на расстоянии 12 км от Лауфена. Миллер принял чрезвычайно смелое решение: передавать в период выставки электроэнергию из Лауфена, не в Хейльбронн, а во Франкфурт-на-Майне. Расстояние между Лауфеном и Франкфуртом составляло 170 км. Миллер считал, что электропередача должна быть осуществлена на переменном токе. Вот почему он вспомнил о работах в области переменного тока молодого шеф-электри-

ка берлинской фирмы AEG Михаила Осиповича Доливо-Добровольского и сделал от имени выставочного комитета этой фирме и швейцарской фирме «Эрликон», работавшей по лицензии фирмы AEG, официальное предложение передать электроэнергию из Лауфена во Франкфурт-на-Майне.

Следует отметить, что в то время как Тесла и его сотрудники пытались усовершенствовать двухфазную систему, в Европе была разработана другая, более совершенная и экономичная электрическая система – трехфазная. В 1887–1889 гг. многофазные системы разрабатывались с большим или меньшим успехом несколькими учеными и изобретателями (Ч. Бредли, Ф. Хазальвандер, М.О. Доливо-Добровольский). Наибольших успехов добился Доливо-Добровольский, который сумел придать своим работам практический характер. Поэтому он по праву считается основоположником техники трехфазных токов.

В течение 1888–1890 гг. им были конструктивно разработаны все основные элементы трехфазной системы электроснабжения: трансформатор, трехпроводная и четырехпроводная линии передачи и асинхронный трехфазный двигатель в двух его основных модификациях (с короткозамкнутым и фазным ротором). Принцип построения многофазных синхронных генераторов был уже известен. Доливо-Добровольский показал, что его трехфазная система является оптимальной и имеет следующие важные преимущества [2, 3]:

- значительно (примерно в 3 раза) уменьшенные пульсации намагничивающей силы по окружности статора трехфазного асинхронного двигателя по отношению к двухфазному двигателю, что увеличивает его к.п.д.;
- на три провода трехфазной линии при прочих равных условиях требуется меди на 25 % меньше, чем на два провода однофазной системы;
- четырехпроводная трехфазная сеть обладает тем выгодным свойством, что она допускает определенную несимметрию нагрузок.

Конструкции асинхронных двигателей Доливо-Добровольского были настолько совершенны, что не перенесли сколько-нибудь существен-

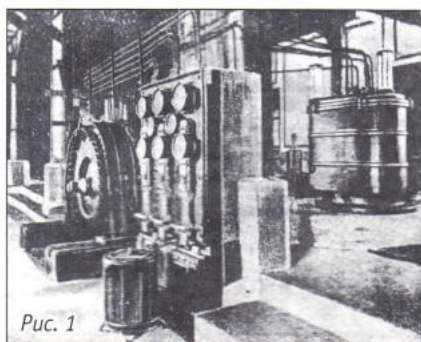


Рис. 1

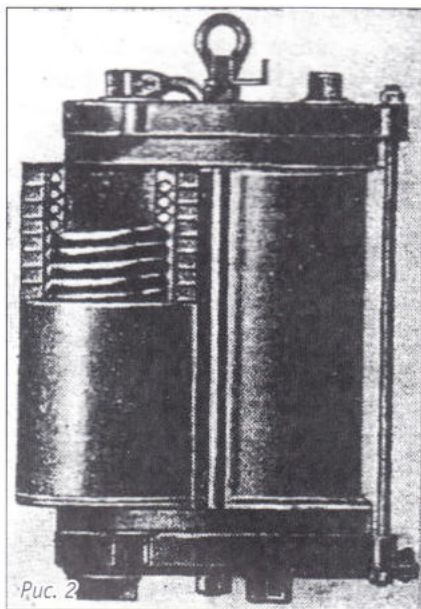


Рис. 2

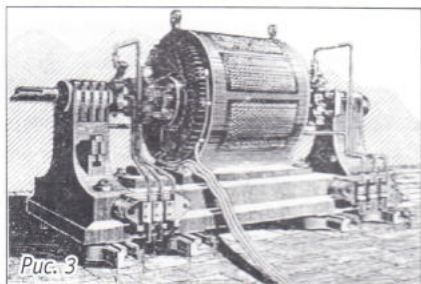


Рис. 3

ных изменений более чем за сто лет своего существования.

Доливо-Добровольский был настолько уверен в своей системе трехфазных переменных токов, что убедил своего директора Ратенау согласиться на эксперимент. Немедленно дал свое принципиальное согласие и директор фирмы «Эрликон» полковник Губер. Следует отдать должное руководителям этих двух фирм, которые согласно замечанию Миллера «...имели мужество связать с репутацией своих фирм предприятие, полное непредвидимых затруднений, но имеющее громадное значение для будущности электротехники».

Как и следовало ожидать, электротехнический мир в связи с публи-

кацией первых сообщений о проекте электропередачи «Лауфен – Франкфурт» раскололся на два лагеря. Одни восторженно приветствовали это смелое решение, другие отнеслись к нему как к шумной, но беспочвенной рекламе. Идею Миллера объявили утопией, подсчитывали к.п.д., причем у одних он получался 12 %, у других – 5 %, а максимальным к.п.д. считали в 15 %. Сомнения в экономичности трансформации токов высказал знаменитый Депре. Даже наиболее осведомленные о работах Доливо-Добровольского лица выражали опасения, что к.п.д. передачи может оказаться ниже 50 %. Только абсолютная убежденность Доливо-Добровольского и безграничный оптимизм Губера спасли положение.

Между тем, пока газеты и журналы занимались подсчетами к.п.д. фирмы AEG и «Эрликон» развивали энергичную деятельность. Очень активно включился в работу по подготовке к Франкфуртской выставке Чарльз Броун, главный инженер фирмы «Эрликон». Вскоре было принято решение провести предварительные испытания высокого напряжения. Это решение было вполне логичным. В промышленности еще никогда до этого не имели дела с напряжениями выше 10000 В. Предполагалось, что передача энергии из Лауфена во Франкфурт будет осуществляться при напряжении примерно 25000 В. Однако едва ли было разумным совершать столь значительный скачок без предварительного эксперимента. Проведение этого эксперимента было поручено фирме «Эрликон» [4].

Поскольку трехфазные машины и трансформаторы еще не были изготовлены, предварительные испытания было решено провести на однофазном переменном токе. Во дворе завода в Эрликоне была натянута в несколько рядов двухпроводная линия длиной в 3 км и установлены машины, трансформаторы и приборы. 24 января 1891 г. в присутствии представителей фирм, правления выставки, правительств германских земель, по территории которых должна была пройти линия передачи энергии «Лауфен – Франкфурт», государственного управления почт, управления телеграфа был проведен предваритель-

ный опыт. От AEG в проведении опыта участвовал Доливо-Добровольский.

Напряжение на опытной установке менялось путем изменения скорости генератора. Были проведены опыты при напряжениях до 15 кВ, до 20 кВ, до 30 кВ, и, наконец, до 33 кВ. При испытаниях определяли расстояния между проводами, при которых происходил разряд, инициировали короткие замыкания и проверяли действие защиты, имитировали дождь, испытывали различные конструкции фарфоровых изоляторов, исследовали влияние линии сильного тока на телефонную линию. Все испытания дали положительный результат. Правление выставки и правительственные учреждения убедились в возможности передачи высокого напряжения. В заключение опытов Доливо-Добровольский продемонстрировал всем присутствовавшим свою новую систему трехфазного тока «Drehstrom» на примере электродвигателя в 1 л.с. 20 марта 1891 г. электротехническую общественность подробно ознакомили с новой системой Доливо-Добровольского, опубликовав его статью о трехфазном токе в журнале *Elektrotechnische Zeitschrift*, № 12, 13 [5].

Директор AEG Ратенау под влиянием многочисленных отрицательных высказываний, несмотря на благоприятные результаты испытаний в Эрликоне, не мог решиться на применение запроектированного напряжения в 25 кВ. Он успокоился только тогда, когда Доливо-Добровольский согласился первое время применять напряжение не выше 15 – 16 кВ, а затем, если опыты будут удачными, повысить напряжение до 25 – 30 кВ.

25 марта 1891 г. руководством обеих фирм было принято совместное решение поручить фирме AEG изготовление четырех трехфазных трансформаторов «призматического» типа по 100 кВ·А, асинхронного трехфазного двигателя на 100 л.с., 1000 ламп накаливания по 55 Вт и всей измерительной и коммутационной аппаратуры. Фирме «Эрликон» предстояло изготовить синхронный трехфазный генератор мощностью около 300 л.с. и два трехфазных трансформатора по 150 кВ·А. Проектирование воздушной линии было



поручено інженеру Еберту, а виготовлення проводів було замовлено фірмі «Гессе і синів», яка взялась безплатно, в цілях реклами, передати 60 тонн мідної проволоки виставочному комітету на весь період виставки.

Необхідність виготовлення чотирьох трьохфазних трансформаторів фірмою AEG об'яснялась указаною вище обережністю директора Ратенау, не ризикнувши сразу применити більш високе, ніж 15 кВ, напругу. Для того щоб внаслідок мати можливість випробувати роботу лінії при напругах порядку 25 кВ, і повинні були бути виготовлені AEG чотири трансформатори: передбачалося включати по два трансформатори на кожному кінці лінії таким чином, щоб їх обмотки низької напруги були з'єднані паралельно, а обмотки високої напруги – послідовно.

На всі роботи по виготовленню обладнання і спорудженню лінії відводилося всього півроку. Задача, поставлена перед Доливо-Добровольським, була дуже складною і відповідальною. Він за півроку повинен був спроектувати і виготовити небували по потужності асинхронний двигун (100 л.с.) і трансформатори (100 – 150 кВ·А). Достатньо сказати, що максимальна потужність однофазних трансформаторів становила тоді тільки 30 кВ·А. Саме неприємне заключалося в тому, що не могло бути і мови об досвідчених конструкціях: для цього не було часу. Крім того, навіть виготовлені двигун і трансформатори не могли бути випробувані на заводі: для цього в Берліні не було трьохфазного генератора відповідної потужності. Генератор для Лауфенської станції виготовлявся в Ерліконі. Отже, всі елементи електропередачі предстояло включити безпосередньо на виставці. Найменша помилка була б непростительною. Крім того, на плечі Доливо-Добровольського лежала відповідальність, пов'язана з необхідністю нагляду за проектуванням і монтажними роботами в час спорудження лінії електропередачі. Доливо-Добровольський блискуче справився со

своєю задачею. 15 серпня 1891 г., точно в призначений термін, всі елементи лінії електропередачі були передані правлінню виставки [6]. На **рис. 1 – 3** представлені відповідно загальний вигляд електричної частини гідроелектростанції в Лауфені, трансформатор АЕГ і трьохфазний асинхронний двигун Доливо-Добровольського.

Перед пуском лінії електропередачі виникли несподівані труднощі [7]. Справа в тому, що лінія електропередачі перетнула території чотирьох німецьких земель: Баден, Вюртемберг, Гессен і Пруссію, місцеві влади з яких дуже побоювалися високої напруги. Люди випробували нестерпиме почуття страху перед дерев'яними стовпами з табличками, на яких був зображений череп. Людей також лякало і те, що обладнання на електростанції було заземлено, як була заземлена і нейтраль трансформатора. Особливі побоювання пов'язувалися з можливістю обриву проводу і його падіння на рейси залізничної дороги. Виставочному комітету і фірмам, спорудившим лінію електропередачі, довелося провести величезну роз'яснювальну роботу, переконуючи чиновників в тому, що всі небезпеки передбачені і лінія надійно захищена. Однак адміністрація Бадена все ж відмовилася в дозвілі з'єднати ділянки вже готової лінії на своїй межі. Для того щоб усунути сумніви місцевих влад, Доливо-Добровольський провів небезпечний, але дуже переконливий експеримент. Коли лінія була вперше включена під напругу, один із проводів на межі Бадена і Гессена був оборваний штучним шляхом, і він з величезною силою впав на рейси залізничної дороги. Доливо-Добровольський в той же момент підняв провод голими руками – настільки він був впевнений, що спроектована ним захист спрацює надійно.

25 серпня 1891 г. в 12 годин дня на виставці вперше загорілися 1000 електроламп, живлених струмом лауфенської гідроелектростанції. Наступного дня був успішно апробований трьохфазний асинхронний двигун потужністю 100 л.с., кото-

рий 12 вересня вперше привів в дію 10-метровий декоративний водоспад. Доливо-Добровольський розповідав, що серед публіки сформувалося думка, що в цьому водоспаді журчить «...істинна вода з Неккара», передавана в Франкфурт із Лауфена. Це був триумф системи трьохфазного струму, це було блискуче рішення проблеми передачі енергії на великі відстані.

В жовтні – листопаді 1891 г. Міжнародна випробувальна комісія провела випробування Лауфен-Франкфуртської електропередачі. Ці випробування дали наступні результати: мінімальний к.п.д. електропередачі (відношення потужності на вторинних зажимах трансформатора в Франкфурті до потужності на валу турбіни в Лауфені) становив 68,5 %, максимальний – 75,2 %; лінійна напруга при випробуваннях – близько 15 кВ, а при більшій високій напрузі – 25,1 кВ максимальний к.п.д. становив 78,9 %.

В протиставленні постійний – змінний струм переміг змінний струм, і «гладкий утенок», перетворившись в «прекрасного лебедя», почав свій перемігний «літ» по всіх країнах світу.

Література:

1. Веселовський О.Н. Михайл Осипович Доливо-Добровольський. – М.-Л.: ГЗІ, 1958, с. 102 – 103.
2. Доливо-Добровольський М.О. *Із історії трьохфазного струму / Обрані твори (о трьохфазному струмі)*. – М.: ГЗІ, 1948, с. 125 – 188.
3. Там же, де 1, с. 75 – 76.
4. *Випробування в Ерліконі над струмом високої напруги*. – «Електричність», 1891, № 7, с. 98 – 99.
5. Доливо-Добровольський М.О. *Передача енергії засобом змінних струмів різних фаз (Drehstrom)*. / *Обрані твори (о трьохфазному струмі)*. – М.: ГЗІ, 1948, с. 21 – 52.
6. Канн Г. Лауфен – Франкфуртська передача енергії, Переклад статті опублікований в журналі «Електричність», 1891, № 20, с. 282 – 284.
7. *Історія електротехніки*. Під ред. І.А. Глебова. – М.: Вид-во МЗІ, 1999, с. 111 – 112.