

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

В последней трети XIX века во многих крупных промышленных центрах Европы и Америки стала очень остро ощущаться энергетическая проблема. Жилые дома, транспорт, фабрики и мастерские требовали все больше топлива, подвозить которое приходилось издалека, вследствие чего цена на него постоянно росла. В этой связи то здесь, то там стали обращаться к гидроэнергии рек, гораздо более дешевой и доступной. Вместе с тем повсеместно возрастал интерес к электрической энергии. Уже давно было отмечено, что этот вид энергии чрезвычайно удобен: электричество легко генерируется и так же легко преобразуется в другие виды энергии, без труда передается на расстояние, подводится и дробится.

Первые электрические станции обычно представляли собой электрогенератор, присоединенный к паровой машине или турбине, и предназначались для снабжения электроэнергией отдельных объектов (например, цеха или дома, в крайнем случае, квартала). С середины 80-х годов стали строиться центральные городские электростанции, дававшие ток прежде всего для освещения (первая такая электростанция была построена в 1882 году в Нью-Йорке под руководством Эдисона.) Ток на них вырабатывался мощными паровыми машинами. Но уже к началу 90-х годов стало ясно, что таким образом энергетическую проблему не разрешить, поскольку мощность центральных станций, расположенных в центральной части города, не могла быть очень большой. Использовали они те же уголь и нефть, то есть не снимали проблемы доставки топлива.

Дешевле и практичнее было возводить электростанции в местах с дешевыми топливными и гидроресурсами. Но, как правило, местности, где можно было в большом количестве получать дешевую электроэнергию, были удалены от промышленных центров и больших городов на десятки и сотни километров. Таким образом, возникла другая проблема — передачи электроэнергии на большие расстояния.

Первые опыты в этой области относятся к самому началу 70-х годов XIX века, когда пользовались в основном постоянным током. Они показали, что как только длина соединительного провода между генератором тока и потребителем этот ток двигателем превышала несколько сотен метров, ощущалось значительное снижение мощности в двигателе из-за больших потерь энергии в кабеле. Это явление легко объяснить, если вспомнить о тепловом действии тока. Проходя по кабелю, ток нагревает его. Эти потери тем больше, чем больше сопротивление провода и сила проходящего по нему тока. (Количество выделяющейся теплоты C легко вычислить. Формула имеет вид: $Q = R \cdot I^2$, где I — сила проходящего тока, R — сопротивление кабеля. Очевидно, что сопротивление провода тем больше, чем больше его длина и чем

меньше его сечение. Если в этой формуле принять $I=P/U$, где P — мощность линии, а U — напряжение тока, то формула примет вид $P=R \cdot P^2/U^2$. Отсюда видно, что потери на тепло будут тем меньше, чем больше напряжение тока.) Имелось только два пути для снижения потерь в линии электропередач: либо увеличить сечение передающего провода, либо повысить напряжение тока. Однако увеличение сечения провода сильно удорожало его, ведь в качестве проводника тогда использовалась достаточно дорогая медь. Гораздо более выигрыша сулил второй путь.

В 1882 году под руководством известного французского электротехника Дебре была построена первая линия электропередач постоянного тока от Мисбах до Мюнхена, протяженностью в 57 км. Энергия от генератора передавалась на электродвигатель, приводивший в действие насос. При этом потери в проводе достигали 75%. В 1885 году Дебре провел еще один эксперимент, осуществив электропередачу между Крейлем и Парижем на расстояние в 56 км. При этом использовалось высокое напряжение, достигавшее 6 тысяч вольт. Потери снизились до 55%. Было очевидно, что, повышая напряжение, можно значительно повысить КПД линии, но для этого надо было строить генераторы постоянного тока высокого напряжения, что было связано с большими техническими сложностями. Даже при этом сравнительно небольшом напряжении Дебре приходилось постоянно чинить свой генератор, в обмотках которого то и дело происходил пробой. С другой стороны, ток высокого напряжения нельзя было использовать, поскольку на практике (и, прежде всего, для нужд освещения) требовалось совсем небольшое напряжение, порядка 100 вольт. Для того чтобы понизить напряжение постоянного тока, приходилось строить сложную преобразовательную систему: ток высокого напряжения приводил в действие двигатель, а тот, в свою очередь, вращал генератор, дававший ток более низкого напряжения. При этом потери еще более возрастали, и сама идея передачи электроэнергии становилась экономически невыгодной.

Переменный ток в отношении передачи казался более удобным хотя бы уже потому, что его можно было легко трансформировать, то есть в очень широких пределах повышать, а затем понижать его напряжение. В 1884 году на Туринской выставке Голяр осуществил электропередачу на расстояние в 40 км, подняв с помощью своего трансформатора напряжение в линии до 2 тысяч вольт. Этот опыт дал неплохие результаты, но и он не привел к широкому развитию электрификации, поскольку, как уже говорилось, двигатели однофазного переменного тока по всем параметрам уступали двигателям постоянного тока и не имели распространения. Таким образом, и однофазный переменный ток было невыгодно передавать на большие расстояния. В следующие годы были разработаны две системы многофазных токов — двухфазная Теслы и трехфазная Доливо-Добро-вольского. Каждая из них претендовала на господствующее положение в электротехнике. По какому же пути должна была пойти электрификация? Точного ответа на этот вопрос пока что не знал никто. Во всех странах шло оживленное обсуждение достоинств и

недостатков каждой из систем токов. Все они имели своих горячих сторонников и ожесточенных противников. Некоторая ясность в этом вопросе была достигнута только в следующем десятилетии, когда был сделан значительный прорыв в деле электрификации. Огромную роль в этом сыграла Франкфуртская международная выставка 1891 года.

В конце 80-х годов встал вопрос о сооружении центральной электростанции во Франкфурте-на-Майне. Многие германские и иностранные фирмы предлагали городским властям различные варианты проектов, предусматривающие применение либо постоянного, либо переменного тока. Обербургомистр Франкфурта находился в явно затруднительном положении: он не мог сделать выбор там, где это было не под силу даже многим специалистам. Для выяснения спорного вопроса и решено было устроить во Франкфурте давно планировавшуюся международную электротехническую выставку. Ее главной целью должна была стать демонстрация передачи и распределения электрической энергии в различных системах и применениях. Любая фирма могла продемонстрировать на этой выставке свои успехи, а международная комиссия из наиболее авторитетных ученых должна была подвергнуть все экспонаты тщательному изучению и дать ответ на вопрос о выборе рода тока. К началу выставки различные фирмы должны были построить свои линии передачи электроэнергии, причем одни собирались демонстрировать передачу постоянного тока, другие — переменного (как однофазного, так и многофазного). Фирме АЭГ было предложено осуществить передачу электроэнергии из местечка Лауфен во Франкфурт на расстояние 170 км. По тем временам это было огромное расстояние, и очень многие считали саму идею фантастической. Однако Доливо-Добровольский был настолько уверен в системе и возможностях трехфазного тока, что убедил директора Ротенау согласиться на эксперимент.

Когда появились первые сообщения о проекте электропередачи Лауфен-Франкфурт, электротехники во всем мире разделились на два лагеря. Одни с энтузиазмом приветствовали это смелое решение, другие отнеслись к нему как к шумной, но беспочвенной рекламе. Подсчитывали возможные потери энергии. Некоторые считали, что они составят 95%, но даже самые большие оптимисты не верили, что КПД такой линии превысит 15%. Наиболее известные авторитеты в области электротехники, в том числе знаменитый Дебре, высказывали сомнения в экономической целесообразности этой затеи. Однако Доливо-Добровольский сумел убедить руководство компании в необходимости взяться за предложенную работу.

Поскольку до открытия выставки оставалось совсем мало времени, строительство ЛЭП проходило в большой спешке. За полгода Доливо-Добровольский должен был спроектировать и построить небывалый по мощности асинхронный двигатель на 100 л. с. и четыре трансформатора на 150 киловатт, при том что максимальная мощность однофазных трансформаторов составляла тогда только 30 киловатт. Не могло быть и речи об опытных конструкциях: на это просто не хватало времени. Даже построенный двигатель и

трансформаторы не могли быть испытаны на заводе, так как в Берлине не было трехфазного генератора соответствующей мощности (генератор для Лауфеновской станции строили в Эрликоне). Следовательно, все элементы электропередачи предстояло включить непосредственно на выставке в присутствии многих ученых, представителей конкурирующих фирм и бесчисленных корреспондентов. Малейшая ошибка была бы непростительной. Кроме того, на плечи Доливо-Добровольского легла вся ответственность за проектирование и монтажные работы при сооружении ЛЭП. Собственно, ответственность была даже больше — ведь решался вопрос не только о карьере Доливо-Добровольского и престиже АЭГ, но и о том, по какому пути пойдет развитие электротехники. Доливо-Добровольский прекрасно понимал всю важность стоявшей перед ним задачи и писал позже: «Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмываемого 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 потом должно было развиваться на их основе, пошли бы по пути применения однофазного тока».

В Лауфене была в короткий срок построена небольшая гидроэлектростанция. Турбина мощностью 300 л. с. вращала генератор трехфазного тока, спроектированный и построенный, как уже говорилось, на заводе в Эрликоне. От генератора три медных провода большого сечения вели к распределительному щиту. Здесь были установлены амперметры, вольтметры, свинцовые предохранители и тепловые реле. От распределительного щита три кабеля шли к трем трехфазным трансформаторам «призматического» типа. Обмотки всех трансформаторов соединялись в звезду. Предполагалось вести электропередачу при напряжении в 15 тысяч вольт, но все расчеты делались на работу в 25 тысяч вольт. Для достижения такого высокого напряжения планировалось включить по два трансформатора на каждом конце линии, так чтобы их обмотки низшего напряжения были соединены параллельно, а обмотки высшего — последовательно.

От трансформаторов в Лауфене начиналась трехпроводная линия, подвешенная на 3182 деревянных опорах высотой 8 и 10 м со средним пролетом 60 м. Никаких выключателей на линии не было. Для того чтобы в случае необходимости можно было быстро отключить ток, предусматривались два оригинальных приспособления. Рядом с Лауфенской гидроэлектростанцией были установлены две опоры на расстоянии 2,5 м одна от другой. Здесь в разрыв каждого провода линии включалась плавкая вставка, состоявшая из двух медных проволок диаметром 0,15 мм. Во Франкфурте и вблизи железнодорожных станций (часть линии шла вдоль железнодорожного полотна) были установлены так называемые угловые замыкатели. Каждый из них представлял собой металлический брус, подвешенный с помощью шнура на Г-образной опоре. Достаточно было дернуть за шнур, и брус опускался на все три провода, создавая искусственное короткое замыкание, что вызывало перегорание плавких вставок в Лауфене и обесточивание всей линии. Во

Франкфурте провода подходили к понижающим трансформаторам (они находились на выставке в специальном павильоне), которые снижали напряжение на выходе до 116 вольт. К одному из этих трансформаторов было подключено 1000 ламп накаливания по 16 свечей (55 ватт) каждая, к другому — большой трехфазный двигатель Доливо-Добровольского, размещавшийся в другом павильоне.

Линейное напряжение генератора в Лауфене составляло 95 вольт. Повышающий трансформатор имел коэффициент трансформации равный 154. Следовательно, рабочее напряжение в ЛЭП составляло 14 650 вольт ($95 \cdot 154$). Для того времени это было очень высокое напряжение. Правительства земель, через которые проходила ЛЭП, были встревожены ее сооружением. У некоторых возникало чувство страха даже перед деревянными столбами, на которых были укреплены таблички с черепами. Особые опасения вызывала возможность обрыва провода и падения его на рельсы железной дороги. Выставочному комитету и соорудившим линиям фирмам пришлось провести огромную разъяснительную работу, чтобы убедить правительственных чиновников в том, что все возможные опасности предусмотрены и что линия надежно защищена. Администрация Бадена все же не разрешала соединять участок уже готовой линии на баденской границе. Для того чтобы устранить последние препятствия и рассеять сомнения местных властей, Доливо-Добровольский провел опасный, но весьма убедительный эксперимент. Когда линия была впервые включена под напряжение, один из проводов на границе Бадена и Гессена был искусственно оборван и с яркой вспышкой упал на рельсы железной дороги. Доливо-Добровольский сейчас же подошел и поднял провод голыми руками: настолько он был уверен, что сработает сконструированная им защита. Этот «метод» доказательства оказался очень наглядным и устранил последнюю преграду перед испытаниями линии.

25 августа 1891 года в 12 часов дня на выставке впервые вспыхнула 1000 электрических ламп, питаемых током Лауфенской гидроэлектростанции. Эти лампы обрамляли щиты и арку над входом в ту часть выставки, экспонаты которой относились к электропередаче Лауфен-Франкфурт. На следующий день был успешно испытан двигатель мощностью в 75 киловатт, который 12 сентября впервые привел в действие десятиметровый водопад. Несмотря на то что линия, машины, трансформаторы, распределительные щиты изготовлялись в спешке (некоторые детали, по свидетельству Доливо-Добровольского, продумывались всего в течение часа), вся установка, включенная без предварительного испытания, к удивлению одних и к радости других, сразу же стала хорошо работать. Особое впечатление на посетителей выставки произвел водопад. Однако лица, более осведомленные в вопросах физики и электротехники, радовались в этот день не огромному водопаду, сверкавшему тысячами стеклянных брызг, подсвеченных десятками разноцветных ламп. Их восторг был связан с пониманием того, что этот прекрасный искусственный водопад приводится в действие источником, находящимся на расстоянии 170 км на реке Неккар у местечка Лауфен. Они видели пе-

ред собой блестящее решение проблемы передачи энергии на большие расстояния.

В октябре международная комиссия приступила к испытаниям Лауфен-Франкфуртской линии электропередачи. Было установлено, что потери при электропередаче составляют всего 25%, что являлось очень хорошим показателем. В ноябре линия была испытана при напряжении в 25 тысяч вольт. При этом КПД ее увеличился, и потери снизились до 21%. Подавляющее большинство электриков всех стран мира (выставку посетило более миллиона человек) по достоинству оценило значение Лауфен-Франкфуртского эксперимента. Трехфазный ток получил очень высокую оценку, и ему отныне был открыт самый широкий путь в промышленность. Доливо-Добровольский сразу выдвинулся в число ведущих электротехников планеты, и имя его приобрело мировую известность.

Так была разрешена главная энергетическая проблема конца XIX века — проблема централизации производства электроэнергии и передачи ее на большие расстояния. Для всех стал ясен способ, каким многофазный ток мог быть подведен от далекой электростанции к каждому отдельному цеху, а потом и отдельному станку. Ближайшим следствием возникновения техники многофазного тока явилось то, что в последующие годы во всех развитых странах началось бурное строительство электростанций и широчайшая электрификация промышленности.

Правда, в первые годы она еще осложнялась ожесточенной борьбой между конкурирующими компаниями, стремившимися внедрить тот или иной тип тока. Так, в Америке сначала взяла вверх компания Вестингауза, которая, купив патенты Теслы, старалась распространить двухфазный ток. Триумфом двухфазной системы стало строительство в 1896 году мощной ГЭС на Ниагарском водопаде. Но трехфазный ток вскоре повсеместно был признан наилучшим. Действительно, двухфазная система требовала проведения четырех проводов, а трехфазная — только трех. Кроме большей простоты, она сулила значительную экономию средств. Позже Тесла, по примеру Доливо-Добровольского, предложил объединять два обратных провода вместе. При этом происходило сложение токов, и в третьем проводе тек ток примерно в 1,4 раза больший, чем в двух других. Поэтому сечение этого провода было в 1,4 раза больше (без этого увеличения сечения в цепи возникали перегрузки).

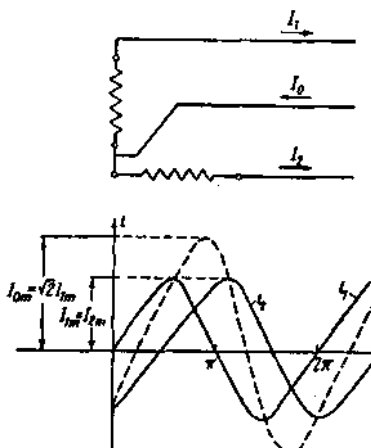


Схема трехпроводной двухфазной цепи.
Токи в фазах и общем проводе

В результате затраты на двухфазную проводку все равно оказывались больше, чем на трехфазную, между тем как двухфазные двигатели по всем параметрам уступали трехфазным. В XX веке трехфазная система утвердилась повсеместно. Даже Ниагарская электростанция была со временем переоборудована на трехфазный ток.

Источник: Рыжков К.В. 100 великих изобретений. — М.: Вече, 1999. — 528с. — (100 великих).