



Этот «гадкий утенок» — переменный ток

Ю.В. Черников

(Продолжение. Начало см. ЭП, № 10, 2009 г.)

Несмотря на полученные результаты, попытки решить проблему передачи электрической энергии на постоянном токе, осуществленные в 80-х годах XIX века в Европе, не принесли желаемых результатов. Объяснялось это следующим противоречием. С одной стороны, практика конструирования и изготовления электрических машин и аппаратов постоянного тока достигла определенных положительных результатов, двигатели постоянного тока обладали рабочими характеристиками, отвечавшими большинству требований промышленности. Но с другой стороны, широкая электрификация промышленности возможна только при централизованном производстве электроэнергии, а следовательно, только при обеспечении передачи электроэнергии на значительные расстояния. Однако для передачи энергии требовалось получить высокое напряжение, а технические возможности того времени не позволяли изготавливать генераторы постоянного высокого напряжения: машины Депре часто выходили из строя из-за повреждения изоляции. Кроме того, электроэнергию постоянного высокого напряжения не могли легко использовать потребители, поскольку нужно было изготовить двигатель-генераторную установку для преобразования высокого напряжения в низкое [1].

Следует отметить, что в начале 80-х годов XIX века массовыми потребителями электрической энергии могли стать только источники света, вследствие чего первые центральные электростанции проектировались, как правило, для питания осветительной

нагрузки и вырабатывали постоянный ток. Первая в мире центральная электростанция постоянного тока была построена в 1882 г. в Нью-Йорке на Перлстрит (район нижнего Манхеттена) под руководством Томаса Альвы Эдисона [2]. Общая мощность электростанции превышала 500 кВт. Станция снабжала электроэнергией обширный по тому времени район площадью 2,5 км². Вскоре в Нью-Йорке были построены еще несколько электростанций.

Однако проектировщики этих станций столкнулись с трудностями, которые в достаточной степени так и не были преодолены. Радиус электроснабжения определялся величиной допустимых потерь напряжения в электрической сети и не превышал 1,2 – 1,5 км. Именно это обстоятельство заставляло строить электростанции в центральных районах города, что существенно повышало стоимость строительства, так как земля в центре города была чрезвычайно дорога, а также затрудняло обеспечение этих станций водой и топливом.

Трудности, связанные с передачей электрической энергии на постоянном токе, и ограниченный радиус действия центральных электростанций постоянного тока направили мысли ученых и изобретателей на разработку теории и техники переменного тока. Когда основные элементы техники переменного тока (генераторы, трансформаторы [3]) были разработаны, начались попытки передачи электрической энергии на значительные расстояния. В 1883 г. французский электротехник Люсьен Голяр осуществил передачу мощности в 20 л.с. на расстояние 23 км для питания осветительных установок Лондонского метрополитена. Трансформаторы повышали

напряжение до 1500 В. В 1884 г. на Туринской выставке тот же Голяр осуществил передачу мощности 40 л.с. на расстояние 40 км при напряжении 2000 В.

В 1889 г. перед английским инженером Себастьяном Ферранти была поставлена задача обеспечить электроэнергией весь район лондонского Сити. Но поскольку стоимость земельного участка в центре города была исключительно высока, для строительства этой новой электростанции было выбрано место в одном из предместий Лондона – Дептфорде, находящемся в 12 км от Сити. На этой электростанции были установлены генераторы переменного тока мощностью по 1000 л.с. и напряжением 10 кВ. На четырех городских подстанциях, питавшихся по четырем магистральным кабельным линиям, напряжение понижалось до 2400 В, а затем уже у потребителей (в домах) понижалось до 100 В.

Примером крупной гидростанции однофазного тока, питавшей осветительную нагрузку, может служить станция, построенная в 1889 г. на водопаде вблизи Портленда, США. Энергия с этой станции передавалась на расстояние 14 миль в Портленд.

В России первая центральная станция однофазного тока была построена венгерской фирмой «Ганц и К°» в Одессе в 1887 г. [4]. Основным потребителем электроэнергии была система электрического освещения нового театра. На станции были установлены два генератора общей мощностью 160 кВт при напряжении на зажимах 2 кВ и частоте 50 Гц. От распределительного щита станции энергия поступала в линию протяженностью 2,5 км, ведущую к трансформаторной подстанции театра, где напряжение понижалось до 56 В,



на которое были рассчитаны лампы накаливания. Однако опять не все было ладно.

Во второй половине 80-х годов XIX столетия возникла задача включения в сеть электростанций переменного тока силовой нагрузки. Но однофазные двигатели переменного тока имели совершенно неприемлемые для практических целей характеристики: они либо вообще не имели пускового момента (синхронные двигатели), либо пускались с очень большим трудом из-за тяжелых условий коммутации тока (коллекторные двигатели). Поэтому область применения однофазного тока в рассматриваемый период времени ограничивалась почти исключительно электрическим освещением, что не соответствовало требованиям промышленности.

В конце 80-х годов XIX столетия по обе стороны Атлантического океана в электротехнических кругах разных стран все еще остро стоял вопрос: какой ток использовать в промышленности – постоянный или переменный?

Как было сказано в первой части статьи, напряжение однофазных цепей переменного тока можно легко повышать и понижать с помощью трансформаторов в любых желаемых пределах и, таким образом, затруднения для передачи электрической энергии отсутствовали. С другой стороны, однофазные двигатели переменного тока имели неприемлемые для использования пусковые характеристики: либо вообще не имели пускового момента (синхронные двигатели) и для их запуска приходилось использовать постоянный ток [5], либо пускались с большим трудом (коллекторные двигатели) из-за тяжелых условий коммутации тока [1].

Прогресс в области использования переменного тока в электроприводе начался с открытием вращающегося магнитного поля.

В 1888 г. итальянский физик Галилео Феррарис и сербский инженер и ученый Никола Тесла сообщили о результатах своих работ (выполненных независимо друг от друга) по созданию вращающегося магнитного поля при помощи двух

переменных токов, сдвинутых относительно друг друга на 90 электрических градусов [1].

Для получения двух таких токов Феррарис предложил пользоваться методом «расщепления фазы» или, иначе говоря, методом введения искусственной фазы. Такой сдвиг Феррарис наблюдал между первичным и вторичным токами недогруженного однофазного трансформатора с разомкнутым сердечником системы Голяра – Гиббса. Феррарис построил небольшую экспериментальную модель индукционного двигателя с непрерывным вращением вала, однако не придавал серьезного значения своему изобретению, поскольку, по его ошибочным расчетам, КПД подобного электродвигателя не мог превосходить 50 %, что было совершенно неприемлемо для промышленного применения.

В 1884 г. Тесла переехал из Европы в США и в конце 1887 г. подал первые семь патентных заявок на предложенные им системы многофазных электрических машин. 1 мая 1888 г. ему были выданы на них патенты. Только в области многофазных машин Тесла получил 41 патент. Наиболее типичной схемой установок «системы Тесла» являлась схема, содержащая двухфазный синхронный генератор и асинхронный двигатель. Ротор двигателя имел обмотку в виде двух взаимно перпендикулярных короткозамкнутых катушек, причем сопротивление обмотки было значительным.

Тесла считал двухфазную систему наиболее экономичной. Следует отметить, что в некоторых американских патентах Тесла указывал на возможность получения как несвязанной трехфазной системы с шестью линейными проводами, так и связанной трехфазной системы, имеющей только три линейных провода, но все свои усилия в практической деятельности он направлял по пути усовершенствования двухфазной системы. Как раз в это время в США обострилось противостояние между сторонниками постоянного и переменного токов. Во главе двух конкурирующих сторон стояли, с одной стороны, Томас Эдисон и фирма Edison

Electric Light Company (после 1888 г. – Edison General Electric Company), добивавшиеся полного признания постоянного тока и, с другой стороны, Джордж Вестингауз мл. и фирма Westinghouse Electric Company, подерживавшие переменный ток.

К середине 1886 г. число центральных электростанций Эдисона достигло 58 и они могли питать около 150 тыс. ламп накаливания. Практически никто не мог серьезно угрожать доминирующему положению фирмы Edison Electric Light Company.

Переменный ток первоначально использовался для освещения дуговыми лампами. Применение его в системах распределения энергии для питания ламп накаливания сдерживалось отсутствием эффективных трансформаторов.

В 1885 г. Вестингауз прочел об использовании переменного тока в Европе совместно с трансформаторами, продемонстрированными в Англии Голяром и Гиббсом. Эти трансформаторы, первичные обмотки которых включались последовательно, предназначались уже не только для «дробления» энергии, но и для преобразования напряжения, т.е. имели коэффициент трансформации, отличный от единицы. Для схемы «дробления» энергии, предложенной выдающимся российским изобретателем-электротехником Павлом Николаевичем Яблочковым, трансформаторы с разомкнутым сердечником вполне удовлетворяли техническим требованиям. При последовательном соединении первичных обмоток включение и выключение одних потребителей не оказывало существенного влияния на режим работы других. Летом 1885 г. Вестингауз приобрел преимущественное право на использование патентов Голяра-Гиббса в США и добился разрешения на разработку оборудования для экспериментальной электростанции в Грейт-Баррингтоне, штат Массачусетс. Эксперименты с переменным током под руководством Уильяма Стенли проходили успешно.

В это же время в Европе (братья Джон и Эдвард Гопкинсон, Англия,



1884 г.) были сконструированы первые трансформаторы с замкнутым сердечником, которые обладали значительно лучшими характеристиками по сравнению с трансформаторами с разомкнутым сердечником (меньший намагничивающий ток, а следовательно, меньше потери и больший КПД). В 1884 – 1885 гг. венгерские электротехники Миклош Дери, Отто Блати и Карел Циперновский разработали эффективный трансформатор в нескольких модификациях (кольцевой, броневой, стержневой). В том же 1885 г. Дери получил патент на параллельное включение первичных обмоток трансформаторов и показал преимущества такого включения. К началу 1886 г. Стенли разработал трансформаторы, первичные обмотки которых можно было подключать непосредственно к высоковольтному генератору, т. е. включать их параллельно, а не последовательно. Конструкция трансформаторов Стенли позволяла производить их серийно при помощи обычных технологических процессов. К концу марта 1886 г. Стенли завершил строительство станции в Грейт-Баррингтоне. Ее испытания прошли успешно. Таким образом, фирма Westinghouse Electric Company получила возможность повышать переменное напряжение для эффективной передачи и затем понижать его при распределении. В конце 1886 г. фирма Westinghouse начала поставку первой коммерческой энергосистемы переменного тока в Буффало. Число станций системы Вестингауза быстро росло, и к сентябрю 1887 г. они питали почти 135 тыс. электроламп.

В системе Вестингауза электроэнергия обычно передавалась на напряжении 1 кВ, а в системе Эдисона – на напряжении 240 В в случае трехпроводной системы. Высокое переменное напряжение позволяло при одинаковой заданной мощности использовать линии передачи с гораздо более тонкими проводами. Это имело первостепенное значение, поскольку стоимость меди составляла основную часть капиталовложений на строительство центральных электростанций. Следует отметить, что оборудование переменного тока

появилось на рынке в исключительно благоприятное время. В начале 1887 г. одному французскому синдикату удалось захватить контроль над продажей большей части производимой в мире меди. Цены на медь, которые в течение всего 1886 и начале 1887 гг. удерживались на уровне 9-10 центов за фунт, стали быстро расти, и к декабрю 1887 г. поднялись до 17 центов и продолжали расти. Внезапное и существенное повышение цен на медь снизило шансы систем постоянного тока, требующих больших расходов на медь. Это явилось одной из основных причин, обусловивших небывалый успех системы Вестингауза уже в первый год ее существования.

В отличие от других систем постоянного тока, пытавшихся конкурировать с системой Эдисона, система переменного тока создавала ей реальную угрозу. В феврале 1888 г. фирма Edison Electric Light впервые серьезно выступила против систем переменного тока. Она опубликовала 83-страничную брошюру в красном переплете под названием «Предостережение» (A Warning), в которой переменный ток подвергся резкой критике. Помимо сопоставления обеих систем по экономическим показателям, брошюра содержала подробное описание опасностей, связанных с применением высокого напряжения, и приложение в виде списка людей, смертельно пораженных переменным током. Во время дискуссий между сторонниками обеих систем передачи электроэнергии противники переменного тока стремились доказать его неспособность конкурировать с постоянным током. По существу, позиции сторонников постоянного тока сводились к следующим положениям [7]:

- основываясь на оценке стоимости медных проводов и трансформаторов, они утверждали, что при передаче электроэнергии на расстояние менее 1,2 км отстаиваемые ими системы дешевле систем переменного тока;

- при использовании повышенного напряжения оборудование переменного тока будет изнашиваться быстрее;

- постоянный ток обеспечит больше возможных источников дохода, так как в то время переменный ток мог использоваться только для освещения и нагревания, поскольку еще не были разработаны электродвигатели переменного тока и эффективно действующие выпрямители;

- постоянный ток использовался для гальванопокрытия и зарядки батарей;

- наличие для систем постоянного тока электрохимического счетчика потребляемой электроэнергии (ампер-часов) в то время как для систем переменного тока счетчики ампер-часов на то время отсутствовали вообще;

- высказывалось опасение, что переменный ток будет создавать помехи в соседних телеграфных и телефонных линиях из-за наличия индуктивной связи;

- считалось, что постоянное напряжение 240 В является «абсолютно безопасным», а переменное напряжение в 1000 В способно «убить лошадь».

С другой стороны, сторонники систем переменного тока выдвигали в свою пользу следующие аргументы:

- при строительстве центральной станции постоянного тока с радиусом обслуживания более одной мили (1,6 км) стоимость медных проводов становилась недопустимо высокой;

- высокая стоимость строительства зданий центральных станций постоянного тока в крупных городах;

- системы переменного тока могли эффективно обслуживать как сельские районы, так и крупные города с высокой плотностью населения.

Литература:

1. История электротехники / Под ред. И.А. Глебова. – М.: Изд-во МЭИ, 1999.
2. Белькинд Л.Д. Томас Альва Эдисон. – М.: «Наука», 1964.
3. Рыжов К.В. Сто великих изобретений. – М.: «ВЕЧЕ», 2000.
4. Каменецкий М.О. Первые русские электростанции. – М.-Л.: ГЭИ, 1951.

(Продолжение следует)