

## Из истории электротехники

### Чарльз Браун (1863–1924) – ученый, инженер, предприниматель

(К 150-летию со дня рождения)

*В крупнейшем в мире Мюнхенском техническом музее (Deutsches Museum), основанном пионером электротехники Оскаром фон Миллером, находится зал электрических машин, в котором собраны самые знаменитые, хрестоматийные электрические машины, прекрасно знакомые по учебникам электромеханики, их конструкции подробно описаны десятками авторов. Вдоль двух противоположных стен зала в нишах установлены бюсты шести выдающихся электромехаников. На одной из стен – создатели машин постоянного тока: Гильберт Зекоб Грамм, Томас Альва Эдисон и Эрнст Вернер фон Сименс. На противоположной стене – также три бюста: Галилео Феррариса, Михаила Осиповича Доливо-Добровольского и Чарльза Юджина Ланцелота Брауна; их работы были посвящены машинам переменного тока.*

*Вышеперечисленные ученые и инженеры являются авторами выдающихся изобретений и открытий, задавшими вектор развития электромашиностроения на многие годы, решающим образом изменившими эту область техники. Их творения не оставались на бумаге, а немедленно подхваченные производителями электрооборудования становились практически мгновенно востребованы потребителями электрических машин, оказав тем самым существенное влияние на прогресс в области электротехники. О жизни и деятельности одного из них пойдет речь в публикуемой статье.*

Чарльз Юджин Ланцелот Браун родился 17 июня 1863 г. в небольшом г. Винтертур на севере Швейцарии. Его отцом был известный инженер, конструктор паровых машин Чарльз Браун, о котором с почтением и гордостью сын будет неизменно упоминать в своих автобиографиях. Вместе с тем, чтобы отличаться от Брауна-старшего, он всегда будет писать свое имя с полными инициалами – Ч.Ю.Л. Браун. В семье Браунов было шестеро детей. Чарльз был старшим ребенком. Окончив начальную школу и гимназию, он два с половиной года проходил обучение в техникуме г. Винтертура и осенью 1882 г. получил диплом по специальности «Машинная техника».

Чарльз уехал в г. Базель, где в течение почти года практиковался в фирме «Bürgin & Alioth». Основатель фирмы – Эмиль Бюргин (1848–1933) – был одним из пионеров швейцарского машиностроения. С 1875 г. фирма производила динамо-машины его собственной конструкции, на которые он получал лицензии в Англии. Бюргин становится первым учителем Брауна в электротехнике и электромеханике. Затем Ч. Браун непродолжительное время работает в фирме отца «SLM», где также за-



Чарльз Юджин Ланцелот Браун  
(1863–1924)

нимается проектированием динамо-машин для осветительного оборудования. В 1884 г. Чарльз Браун поступает на инструментально-машиностроительное предприятие «Эрликон», и в очень короткое время ему поручают руководство электрическим отделом завода. Ему только 21 год. Круг его обязанностей включал разработку и создание генераторов постоянного тока для электропитания бурно развивающихся осветительных систем.

В то время проблема передачи электроэнергии на расстояния, измеряемые километрами, становилась все актуальнее. Электроэнергия требовалась не только для освещения, но и для питания приводных механизмов фабрик и заводов. Эксперименты в этом направлении по всему миру интенсивно велись уже на протяжении нескольких лет. Уместно напомнить знаменитую Мисбах-Мюнхенскую электропередачу длиной в 57 км, осуществленную Марселем Депре и Оскар фон Миллером. Коммерческого успеха этот эксперимент не принес: КПД электропередачи едва достигал 25%, а сама установка работала считанные часы (затем наступил пробой обмоток якоря). Впоследствии Депре в 1885 г. продолжил свои эксперименты и передал мощ-

ность в 116 л.с. из Крейля в Париж на расстояние в 56 км с КПД примерно 45%. Тем не менее это осталось только экспериментом.

Последовавшие за Депре усилия в электропередаче на дальние расстояния существенно продвинули этот вопрос. Но не было практического применения системы «генератор – линия электропередачи длиной в километры – двигатель». Этому мешали два обстоятельства: общий КПД электропередачи не превышал 50%; ее надежность оставляла желать лучшего. Проще и дешевле было перевозить уголь до предприятий или использовать механические «телединамические» передачи с помощью проволочного каната длиной в километры.

Фирма «Эрликон» занималась изготовлением динамо-машин только для электрического освещения. Длина линии электропередачи достигала в лучшем случае нескольких сотен метров. Тем не менее высокий КПД машин, конструируемых Ч. Брауном, а также то обстоятельство, что «динамо-машинами можно было одинаково хорошо пользоваться так же, как и двигателями», привели Брауна к заключению, что «их применение к передаче электроэнергии представляет собой вопрос, который можно разрешить при старательном проектировании и качественном изготовлении».

1886 г. стал решающим в биографии Ч. Брауна. Предприниматель Йозеф Мюллер-Хайбер, основатель «Сфинкс-Верке АГ» в Золотурне, решил использовать электричество для приводов токарного цеха, где выполнялись работы по заказам предприятий часовой промышленности. Применение паровой машины могло отрицательно сказаться на качестве производства. Электрические двигатели, обладающие плавным ходом, более подходили для изготовления высокоточных деталей. Мюллер-Хайбер обратился со своей проблемой в «Эрликон». Последовало жесткое, невиданное по сложности и смелости техническое задание. Чарльз Браун писал по этому поводу: «Мы должны осуществить передачу электроэнергии в Золотурн. Необходимо передавать мощность в 30–50 л.с. на 8000 м и гарантировать при этом КПД 65%, так как иначе проект не будет принят. Можете себе представить, сколько мне для этого еще требуется считать и чертить! Если все получится, то можно считать, что я обеспечил себе весомое положение в профессиональном мире, потому что до настоящего времени подобного никто еще даже близко не достиг» [1].

В составленном Брауном конструкторском отчете читаем: «Поскольку особое значение придавалось максимальной надежности работы всей установки, я остановился на варианте с двумя генераторами и моторами, мощность которых рассчитывалась так, чтобы при необходимости любая пара могла самостоятельно выполнять работу всей уста-

новки... Дабы при заданном расстоянии в 8 км не происходило слишком больших потерь мощности, необходимы, как известно, токи высокого напряжения...» [1].

В качестве генераторов и двигателей были применены двухполюсные машины постоянного тока. По сути они представляли собой усовершенствованную Брауном конструкцию известной машины Джона Гопкинсона, вошедшей в историю электромашиностроения под названием «Машины манчестерского типа» [2]. Эта конструкция была распространена в 80-х годах 19 в. и отличалась от других видов машин постоянного тока тем, что магнитные сердечники индуктора были установлены симметрично по обе стороны якоря. Браун был одним из первых в мире конструкторов, который применил в конструкции своих электрических машин якорь с пазами. Главные размеры машин были следующие: длина 1260 мм; ширина 1340 мм; диаметр якоря 500 мм при весе его обмотки 12 кг и сопротивлении в 0,008 Ом; вес обмотки возбуждения составил 33 кг при сопротивлении в 25 Ом. При номинальной частоте вращения в 700 об/мин машина выдавала 1200 В. Передача энергии от турбины электростанции к генераторам и от двигателей к валам исполнительных механизмов осуществлялась с помощью ременной передачи. Машины были последовательного возбуждения и имели идентичные электромеханические характеристики.

Чтобы понять всю сложность поставленных задач и продуманность технического решения, обратимся к фундаментальному труду Г. Каппа «Электрическая передача электроэнергии» [3]. Автор посвящает целую главу своей монографии описанию электропередачи Кригштеттен – Золотурн, ставя этот проект в первый ряд «прорывных» событий в электротехнике. Конструкцию установки и взаимодействие ее частей он описывает следующим образом:

«Установка состоит из двух генераторов и двух двигателей, причем эти четыре машины соединены последовательно по трехпроводной схеме. Остановились на таком устройстве по следующим причинам:

1. Система остается работоспособной в случае поломки одной из машин;
2. Каждая из машин спроектирована с большим запасом мощности, и установка могла передавать значительно больше половины электроэнергии, даже если она отчасти повреждена;
3. Большое расстояние делает необходимым применение высокого напряжения (от 2000 до 2500 В). Но поскольку в то время на применение столь высокого напряжения в одной машине смотрели как на несколько рискованный опыт, Браун счел более разумным уменьшить риск, построив машины для

половинного напряжения и соединив их последовательно;

4. В случае, если работает только одна группа машин (генератор-двигатель), внешнюю проволоку неработающей цепи можно соединять с обоих концов с уравнивающей проволокой и таким образом уменьшить сопротивление линии».

Линия электропередачи представляла собой три изолированных медных провода диаметром по 6 мм, подвешенных на масляных изоляторах. Расстояние между деревянными столбами составляло 36 м за исключением одного пролета над р. Аарой, где расстояние было увеличено до 120 м. Для усиления конструкции в этом месте провода были выполнены из кремнистой бронзы.

Первые испытания были проведены на заводе «Эрликон» в ноябре 1886 г. Линия электропередачи моделировалась проводом с сопротивлением, эквивалентным реальной линии, которое было равно приблизительно 10 Ом. Испытания показали многообещающий результат: КПД установки достигал 75%. В труде «Развитие швейцарских электроэнергетических предприятий» Вальтер Висслинг писал: «Эта ставшая классикой установка имела столь высокое значение потому, что с ее помощью впервые была доказана возможность получать КПД экономически целесообразного уровня» [4].

Тем не менее, помня об отрицательном опыте предшественников Ч. Брауна по передаче электроэнергии на дальние расстояния, было принято решение провести повторные испытания спустя некоторое время после начала эксплуатации системы. «Эрликон» созвала вторую комиссию экспертов примерно через год после запуска электропередачи. Новые исследования были выполнены в октябре 1887 г. под руководством известнейших профессоров: Фейта, Вебера, Амслер-Лаффона, Келлера и Хагенбаха. Наличие такой представительной комиссии при испытании объясняется большим интересом электротехников к этой актуальнейшей проблеме.

Профессор Федерального политехнического института в Цюрихе Генрих Ф. Вебер, руководивший испытаниями, сообщал: «Чтобы испытываемая установка могла выполнить поставленную задачу — передавать электрическую энергию средней мощностью 30 л.с. за счет использования двух первичных и двух вторичных динамомашин, необходимо рассматривать исчисленный КПД в 75% как КПД реальных условий эксплуатации» [5].

Успех электропередачи из Кригштеттена в Золотурн был замечен как электротехниками, так и промышленниками. Нелишне будет сказать, что сам заказчик этой установки Йозеф Мюллер-Хайбер «остался вполне доволен ее работой с первого же дня». Постепенно, увидев положительную прак-

тику эксплуатации всей системы и оценив ее эффективность, владельцы заводов стали обращаться к электрической передаче. Г. Капп пишет об этом: «Даже те техники, которые сделали своей специальностью «телединамические» передачи, скорее пожалуй, довольны возрастающим применением электрической передачи, избавляющим их от такой работы, которая часто вызывает жалобы даже при самом тщательном выполнении... Не только в Швейцарии, но также в других странах происходит непрерывное возрастание применения электрической передачи».

Энгельберт Арнольд придавал особое значение именно этой электропередаче: «Решающие успехи в передаче электроэнергии были достигнуты лишь после того, как под руководством Ч.Ю.Л. Брауна удалось передать из Кригштеттена в Золотурн на расстояние 8 км мощность 50 л.с. с общим КПД 75% и добиться безупречности и надежности работы оборудования. Этот успех обязан своим происхождением союзу крупного машиностроения с электротехникой. Тем самым передача электроэнергии вышла на новую ступень» [6].

Российский журнал «Электричество» посвятил электропередаче Кригштеттен–Золотурн целых пять больших статей. Это событие подробно освещалось в течение 1887–1888 гг. В основе статей были материалы отчетов профессоров Амслер-Лаффона и Вебера.

Статья Амслер-Лаффона была перепечатана из журнала «London Engineering». Редакция журнала «Электричество», представляя читателям статью, подчеркивала «очень важное практическое значение» электропередачи Кригштеттен–Золотурн. В частности было сказано: «До сих пор были только экспериментальные попытки осуществить передачу тока» [7].

Отчет Генриха Фридриха Вебера отличался педантичной тщательностью и продуманностью всех деталей испытаний электропередачи [5]. Интересна заключительная фраза Вебера в отчете: «До сих пор подобного полезного действия не достигали ни при одной сколько-нибудь значительной установке для передачи работы; столь необычайно благоприятный результат можно было получить только вследствие сочетания нескольких определенных причин: высокое промышленное полезное действие машин Эрликонского завода (от 87 до 89%); относительно небольшое расстояние (около 8 км); сравнительно значительный расход меди на линию, что дает возможность уменьшить ее сопротивление (около 9 Ом); и, наконец, применение относительно больших электровозбудительных сил (2000 В) вместе с почти совершенной изоляцией линии».

Спустя несколько лет 27 декабря 1899 г. на открытии Первого Всероссийского электротехниче-

ского съезда заместитель председателя съезда, выдающийся российский электротехник Александр Иванович Смирнов произнес речь «Успехи электротехники», в которой познакомил участников торжественного собрания с наиболее значимыми успехами в области электротехники за последнее столетие. Александр Иванович не обошел вниманием и факт электропередачи Кригштеттен—Золотурн, о которой, в частности, сказал: «Лишь только было установлено, что электрическая передача имеет несравненные преимущества и заслуживает внимания, промышленность не замедлила прибегнуть к этому новому средству электротехники и стала пользоваться им с большим успехом. В 1888 г. в Швейцарии завод «Эрликон» устроил передачу электрической энергии от Кригштеттенского водоппада в Золотурн. Установка была тщательно исследована профессором Вебером, а практические результаты превзошли всякие ожидания...» [8].

Имя Чарльза Брауна вошло в первый ряд ведущих электротехников того времени. Ему в то время исполнилось только 24 года. Успех Золотурна повлек за собой шквал новых подобных заказов.

Значительное внимание Чарльз Браун уделял разработке специальных динамо-машин для металлургической обработки алюминия. Такой интерес был вызван объективными причинами. В 1886 г. практически одновременно П. Эру (Франция) и Ч. Холл (США) изобрели промышленный способ производства алюминия посредством электролиза глинозема. С этого момента электрометаллургия алюминия начала развиваться очень быстрыми темпами. По всему миру начали строиться электролизеры, в которых источником тока являлись генераторы постоянного тока [9,10]. Первые электролизеры использовали уже существующие динамо-машины с токами до 1000 А. Остро встала задача создания генераторов с токами в тысячи ампер и низким напряжением. Таких машин, которые сильно отличались бы от обычных генераторов постоянного напряжения для освещения и двигателей, еще никто не проектировал. Один из самых первых генераторов подобного типа был создан в Соединенных Штатах компанией Бреша. Эта машина производила 3000 А при 100 В. Получив задание от Нойхаузенской швейцарской металлургической компании на поставку генераторов для электролизеров, компания «Эрликон» активно включилась в работу. Задача была весьма непростой. Сам Браун в короткой автобиографии, занимающей всего две страницы, среди других своих выдающихся проектов упомянул эти генераторы, назвав их «уникальными».

Первые такие машины, спроектированные Брауном, были шести- и восьмиполюсными. 30 июля 1888 г. были проведены первые успешные ис-

пытания динамо-машины с горизонтальным валом, которые показали, что при постоянном режиме эксплуатации генератор способен выдавать ток 12500 А без заметного искрения [11]. Восьмиполюсный генератор, поставленный Эрликоном в Нойхаузен, был первой в истории электротехники машиной большой мощности, имеющей вертикальный вал. Достоинством конструкции было непосредственное соединение вала гидротурбины с якорем генератора. Генератор мощностью 300 л.с. вырабатывал ток в 3000 А [12].

Брауном было разработано еще несколько типов подобных машин, в частности 24-полюсный генератор с вертикальным валом, который на испытаниях производил ток 12000 А при 36 В и 180 об/мин (1889 г.). Все генераторы имели барабанный якорь с несколькими параллельными проводниками в каждом пазу. Существенной деталью было наличие V-образных уравнивающих соединений в обмотках якоря, что позволяло резко уменьшать искрение на коллекторе. Эта удивительная машина показана на рис. 1, на котором для «контраста» показана наименьшая динамо-машина, спроектированная Брауном и производимая «Эрликоном». Высота большой машины составляла 3,8 м, ротор весил 12 т, а полный вес генератора составлял 34,5 т. Вес вращающейся части был облегчен с помощью специального гидравлического приспособления. В дальнейшем генератор был модифицирован и при частоте вращения в 150 об/мин вырабатывал ток 7500 А при напряжении 60 В. Мощность при этом составляла около 600 л.с. Коллектор генератора имел диаметр 1,7 м, который охватывали 120 щеток, расположенных в пять рядов. Магнитопровод статора включал 24 чугунных по-

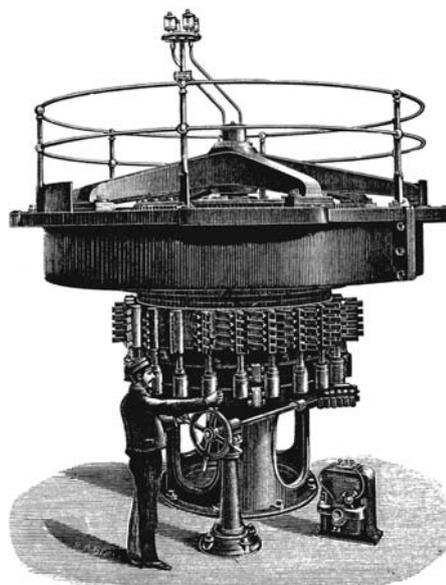


Рис. 1. 24-полюсный генератор для электролизера

люса. В целом генераторная установка занимала три этажа: внизу находилась турбина, в середине внушительный коллектор, в верхней части якорь и индуктор [13].

Самыми известными проектами тех лет были электрификация Шаффгаузенской прядильной фабрики и Кассельская электропередача, которые подробно описаны Гисбертом Каппом как примеры «удачных технических сооружений...» [14]. В карьере Брауна Кассельская электростанция занимает особое место. Именно этот проект считается его первой электропередачей на переменном токе.

К концу 80-х годов 19 в. в электромеханике наметилось новое направление — машины переменного тока. Дальнейший прогресс в электротехнике тормозился техническими сложностями передачи постоянного тока на большие расстояния (десятки и сотни километров).

В 1889 г. Михаил Осипович Доливо-Добровольский, работая в Берлине в немецкой компании «АЕГ», успешно испытал первый асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором мощностью в 100 Вт. Второй спроектированный им асинхронный электродвигатель мощностью 3–5 л.с. был выполнен «совершенно сходно с меньшим», только из технологических соображений ротор был шихтованным. Параллельно был изготовлен и генератор трехфазного тока 15–20 кВт, который был переделан из восьмиполюсной динамо-машины. Начались испытания. Михаил Осипович охарактеризовал их как неудачные: «Пятисильный мотор... разочаровал меня своим относительно малым пусковым моментом, несмотря на более значительное возрастание тока при неподвижном роторе. При этом появился сильный шум, главным образом от вибрации всех соединений. Шум исчезал только при приближении к полному числу оборотов. Во время хода мотор потреблял небольшой ток и работал хорошо» [15].

Двигатель был продемонстрирован руководителям Швейцарских машиностроительных заводов «Эрликон» Петру Эмилю Губеру и Чарльзу Брауну. Директор «АЕГ» Эмиль Ротенау был прекрасно осведомлен о серьезных работах «Эрликона» в области переменных токов и высоких напряжений. Увиденный двигатель чрезвычайно заинтересовал руководство «Эрликон», так как новейшие разработки этой фирмы в области переменных токов тормозились из-за отсутствия практически пригодных многофазных машин. Между «АЕГ» и «Эрликоном» был заключен лицензионный договор. Обе фирмы должны были вести впредь свои исследования совместно, часть расходов по работам в области трехфазных токов взял на себя «Эрликон», который, кроме того, обязался платить «АЕГ» небольшую лицензионную плату за производство электродвигателей

подобной конструкции. С этого момента Доливо-Добровольский должен был «информировать немедленно и подробно технического руководителя заводов «Эрликон» Брауна как об уже выполненной работе, так и о намеченной». Михаил Осипович вспоминал: «Во время одного из моих посещений Браун показал мне проект масляного трансформатора трехфазного тока с радиальными стержнями; эта идея, принадлежавшая... Суинберну, мне чрезвычайно понравилась, так как это облегало мне применение очень высоких напряжений. Я, в свою очередь, обратил внимание Брауна на то, что при проектировании моторов трехфазного тока следует стремиться главным образом к обеспечению возможно меньшего процентуального рассеяния силовых линий. Я доказал ему, что это рассеяние можно уменьшить, если строить электродвигатели с большим числом силовых линий, но с малым числом ампервитков, правда, при этом увеличивается ток холостого хода или ток намагничивания, если не обеспечить одновременно возможно большее уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора. Я начертил ему схемы различных возможных типов электродвигателей и показал, что использованный нами тип Грамма не является самым лучшим именно в отношении рассеяния. В одном из моих писем к Брауну я писал, например, что электродвигатели с индукторами, построенными по типу барабанных, в силу своего устройства не имеющие рассеяния, много лучше; однако я добавил, что, к сожалению, обмотка барабанного типа связана с трудностями, кроме, например, случаев больших машин, когда можно прибегнуть к стержневой обмотке с вилочными соединениями» [15]. Приведенный отрывок показывает, что общие научные интересы Ч. Брауна и М.О. Доливо-Добровольского касались не только вращающихся электрических машин. Они активно работали вместе над трансформаторами и проблемами передачи высоковольтного напряжения.

Доливо-Добровольский пишет: «...тесная связь между «АЕГ» и «Эрликоном» привела к тому, что фирма «Эрликон» также построила в нескольких вариантах электродвигатель трехфазного тока мощностью 1–2 л.с. и в свое время его мне продемонстрировали. ....Электродвигатель «Эрликона» работал безупречно. Он имел якорь в виде беличьего колеса, отличавшийся от берлинского якоря только тем, что его стержни были изолированы от железа якоря» [15].

За «безупречной работой» двигателя «Эрликон» стоял большой труд Чарльза Брауна. История, к счастью, сохранила описание его научных и инженерных поисков по оптимизации конструкции асинхронного двигателя. Исследования Чарльза Брауна привел в своей книге «Многофазные электродвигатели

трические токи и двигатели переменного тока» (1890 г.) Сильванус Томпсон.

Чарльз Браун изготовил четыре статора трехфазного двигателя различной конструкции, но с одинаковыми внутренними диаметрами. Аналогично были сделаны и одиннадцать роторов диаметром 199 мм, которые могли вращаться в любом из четырех статоров. Таким образом, Браун получил возможность испытать 44 различных варианта асинхронного двигателя и сравнить их электро-механические характеристики [12]. На рис. 2, представляющем собой копию чертежа, которым пользовались для изготовления частей экспериментальных двигателей на заводе «Эрликон», показана конструкция четырех статоров и четырех роторов.

Статоры:

1) с граммовской обмоткой, размещенной в 24 закрытых пазах диаметром 18 мм, в каждом пазу 24 витка;

2) выполнен в виде гладкого кольца с намотанной на него в два слоя граммовской обмоткой, разделенной на 24 группы катушек по 19 витков каждая;

3) имел граммовскую обмотку, размещенную в 48 «узких» пазах, в каждом пазу 9 проводников;

4) имел граммовскую обмотку, размещенную в 12 «широких» пазах, в каждом пазу 36 проводников.

Роторы:

1) массивный цилиндр из кованого железа с 44 пазами, каждый из которых получался в результате высверливания двух отверстий;

2) массивный цилиндр двухтавровой формы;

3) шихтованный цилиндр с 30 круглыми пазами, расположенными недалеко от периферии рото-

ра, в пазы вставлены сплошные медные стержни (10 мм), соединенные на концах медными кольцами (беличье колесо);

4) массивный цилиндр из кованого железа с медной оболочкой толщиной 4 мм;

5) массивный кованный цилиндр без пазов;

6) массивный цилиндр из чугуна;

7) массивный цилиндр из стали;

8) цилиндр из кованого железа с четырьмя высверленными широкими каналами (на рис. 2 показан один канал пунктиром с обозначением  $h$ );

9) стальной цилиндр, срезанный по бокам;

10) двухтавровая конструкция ротора, подобная  $b$ , но имеющая шихтованный магнитопровод;

11) массивный цилиндр из кованого железа, имеющий беличье колесо.

Со всеми возможными сочетаниями статоров и роторов Браун провел испытания. Нагрузка задавалась как нажимными устройствами, так и с помощью небольшого генератора постоянного тока, вырабатываемая энергия которого измерялась. Результаты оказались такими:

наилучшие характеристики были у шихтованного ротора с беличьей клеткой;

самым худшим оказался двухтавровый шихтованный ротор — он не вращался даже без нагрузки;

массивный ротор с медной оболочкой был лучше ротора из кованого железа, который в свою очередь превосходил ротор из чугуна;

худшим был признан статор с гладкой поверхностью;

двигатели с зубцовыми статорами развивали больший момент вращения, чем двигатели, имеющие на статоре закрытые пазы;

нагрев массивных роторов двигателей с зубцовыми статорами был сильнее, чем у двигателей с закрытыми пазами; машины с зубцами сильно шумели;

при применении статоров с закрытыми пазами нагрев шихтованного магнитопровода роторов с беличьей клеткой отсутствовал, а нагрев обмотки ротора был незначительным.

Таким образом, Браун выбрал в качестве основной конструкцию ротора в виде шихтованного магнитопровода с беличьей клеткой; статор и ротор имели закрытые пазы.

Доливо-Добровольский отмечает в конструкции трехфазного асинхронного двигателя Брауна один важный новый элемент: «Браун сконструировал их (асинхронные двигатели. — *Авт.*), как и я, с кольцевым индуктором Грамма, но он поместил в закрытые пазы не только стержни якоря, но и обмотку индуктора. Эту идею Брауна я использовал в последующих типах электродвигателей «АЕГ», однако я выполнил пазы с очень узкими прорезами и

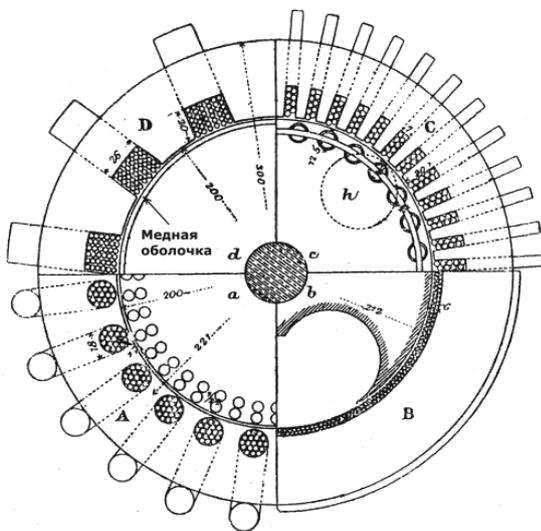


Рис. 2. Набор экспериментальных образцов статоров и роторов трехфазных асинхронных двигателей Чарльза Брауна

таким образом «возникли» полузакрытые пазы, применяемые до настоящего времени» [15].

Объем и тщательность проведенных экспериментов вызывают восхищение. Сильванус Томпсон заметил по этому поводу: «Едва ли другие пионеры этого дела проделали подобные опыты» [12].

Уже через год в 1891 г. на Франкфуртской электротехнической выставке Чарльз Браун продемонстрировал двадцатисильный электродвигатель, вошедший в техническую литературу под названием «электродвигатель трехфазного тока системы Брауна». Двигатель имел многополюсную распределенную барабанную обмотку и короткозамкнутый ротор. На тот момент это был самый совершенный с современной точки зрения трехфазный асинхронный двигатель.

Приведем также отзыв об этом двигателе академика К.И. Шенфера, одного из создателей отечественной школы электромеханики, первого заведующего кафедрой электрических машин МЭИ, который он приводит в своем фундаментальном труде «Асинхронные машины» (1938 г.): «Одним из первых, придавших асинхронному двигателю весьма конструктивную форму, является Браун, который на заводе «Эрликон», в Швейцарии, в 1890 г. построил двигатель мощностью 20 л.с.» [16] (рис. 3).

В этом же году Чарльз Браун приступил к проектированию трехфазного генератора для Лауфенской электростанции, которая должна была снабжать электричеством г. Хайльбронн, находящийся от нее в 12 км. В качестве генерального подрядчика выступал Оскар фон Миллер. Трехфазные асинхронные двигатели должны были изготавливаться «АЕГ», а фирма «Эрликон» получила заказ на изготовление генераторов трехфазного тока мощностью 300 л.с. и масляных трансформаторов. Этот проект сыграл выдающуюся роль в истории электротехники не только потому, что впервые электроснабжение целого города осуществлялось трехфазным током, но еще и благодаря тому, что оборудование, проектируемое и изготавливаемое для электростанции в Лауфене, было использовано для знаменитой Лауфен-Франкфуртской электропередачи. Остановимся подробнее на трехфазном гене-

раторе Ч. Брауна (рис. 4), основные технические данные которого следующие:

мощность, кВт/л.с.	220/300
частота вращения, об/мин	150
фазное напряжение, В	55
фазный ток, А	1400
частота вырабатываемого напряжения, Гц	40
общая масса кг	4500

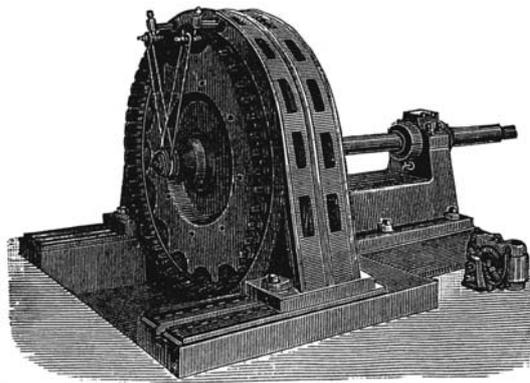


Рис. 4. Общий вид синхронного трехфазного генератора Ч. Брауна

Внешний диаметр статора был равен 1894 мм, внутренний 1764 мм. Длина магнитопровода была всего 380 мм. Шихтованный магнитопровод статора имел 96 внутренних круглых пазов диаметром 33 мм с зубцовым шагом 60 мм. В каждый паз была помещена асбестовая трубка, внутри которой находился медный стержень толщиной в 29 мм. Стержни были соединены между собой вилочными соединениями и образовывали обмотку типа «зигзаг»; 32 стержня составляли одну фазу. Фазы соединялись между собой в звезду. Конец каждой фазы присоединялся к шине, идущей на повышающий трансформатор. Нулевая точка статорной обмотки заземлялась. Шихтованный пакет магнитопровода статора находился в прочной чугунной раме.

Ротор генератора (индуктор) имел 32 полюса и гребенчатую конструкцию, напоминающую современные роторы с клювообразными полюсами. Такая конструкция ротора была выбрана Брауном из-за простоты и дешевизны. При этом индуктор

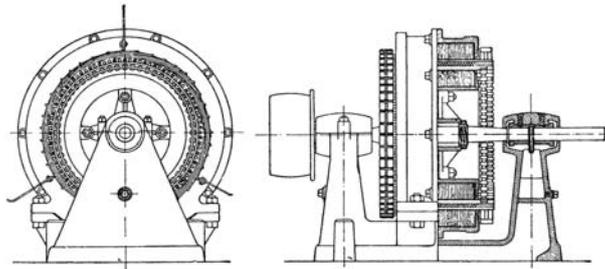


Рис. 3. Трехфазный двадцатисильный асинхронный двигатель конструкции Ч. Брауна

отличался чрезвычайной прочностью и надежностью. Обмотка возбуждения, состоящая из 496 витков проволоки диаметром 5 мм, была намотана в желобе на окружности чугунного шкива, к бокам которого были прикреплены стальные щеки, каждая из которых имела 16 полюсных наконечников. Такая конструкция индуктора требовала минимального возбуждения. При холостом ходе мощность возбуждения составляла всего 0,05% общей мощности машины. При полной нагрузке, когда реакция якоря была максимальной, мощность возбуждения не превышала одного процента общей мощности генератора, т.е. не более 2,2 кВт. Масса обмотки возбуждения составляла не более 300 кг, что для генераторов такой мощности в то время было выдающимся показателем [17].

Электромеханические характеристики лауфенского генератора Брауна были подробно исследованы специальной комиссией экспертов под руководством профессора Вебера в 1891 г. Комиссия была создана для общих испытаний экспонатов всемирной Электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне. Результаты испытаний приводит Сильванус Томпсон в уже упомянутом труде «Многофазные электрические токи и двигатели переменного тока»: «При полной скорости и нормальном напряжении потери на трение и гистерезис (опыт холостого хода. — *Авт.*) достигают 3600 Вт, т.е. меньше 1,7% всей энергии, доставляемой машиной. Потери, вызываемые сопротивлением якоря при полной нагрузке, достигают 3500 Вт. Все потери вместе не превышают 4%, КПД машины больше 95%. Нагревание, вследствие полного отсутствия паразитных токов, очень ничтожно» [12].

Профессор Амслер Лаффон, знавший Брауна еще по испытаниям электропередачи Кригштеттен–Золотурн, считал, что потрясающий успех генератора лауфенского типа объясняется «гениальной простотой его конструкции». Отмечалась также «пожаробезопасность» генератора, поскольку токи короткого замыкания были близки к номинальным [18].

На исключительную технологичность и надежность конструкции генератора Брауна обращал внимание Гисберт Капп: «... Другой момент — это появившаяся возможность делать машины чрезвычайно механическими благодаря использованию трансформатора. Взглянув на эти машины, вы скажете: да, эти машины сконструировал инженер. Это вам не физический прибор; все хорошо скомпоновано, правильно обработано и аккуратно смонтировано; дело имеем с большими стержнями, а не с тонкими намотанными проводками, и вся установка производит впечатление хорошей механической конструкции. ...» [19].

Хочется привести слова выдающегося советского электромеханика, профессора А.В. Иванова-Смоленского об лауфенском генераторе: «Первый трехфазный генератор был спроектирован главным инженером фирмы «Эрликон» Ч. Брауном в сотрудничестве с Доливо-Добровольским... В этом генераторе были использованы все достижения в области конструирования машин постоянного тока, накопленные к тому времени: барабанная обмотка якоря, уложенная в пазы зубчатого шихтованного магнитопровода. Принятое в этом генераторе наиболее рациональное размещение трехфазной обмотки на статоре и обмотки возбуждения на роторе сохранилось во всех современных синхронных машинах» [20].

Работы М.О. Доливо-Добровольского и Ч. Брауна позволили разработать практически совершенную трехфазную систему, дошедшую до настоящего времени почти в неизменном виде. Безусловно, Доливо-Добровольский является основоположником трехфазных токов и ему принадлежит честь создания всех основных ее элементов: генератора, трансформатора, автотрансформатора, трехпроводной и четырехпроводной линий электропередачи, асинхронного двигателя в двух его основных видах (с короткозамкнутым и фазным ротором). Но и вклад Брауна весьма трудно переоценить. Именно благодаря его таланту, опыту, знаниям, энергии, скрупулезности в расчетах и экспериментах и, наконец, техническим и финансовым возможностям его предприятия трехфазная система электроснабжения была создана в столь сжатые сроки. Качество проектирования при этом было таким, что разработанные Брауном конструкции не претерпели изменений за последние 120 лет. Не будь Брауна рядом с Доливо-Добровольским, практическая разработка трехфазной системы затянулась бы на годы, и не известно, по какому пути пошла бы электротехническая мысль в столь жесткой конкуренции между многочисленными проектами систем электроснабжения.

Так, совместная работа двух выдающихся инженеров обогащала их общее дело и способствовала быстрому и плодотворному развитию нового направления в электротехнике. В 1891 г. на Международной Франкфуртской электротехнической выставке была продемонстрирована высоковольтная трехфазная электропередача из Лауфена во Франкфурт. Это историческое событие явилось катализатором применения трехфазных токов. Техническую сторону этого проекта осуществляли совместно М.О. Доливо-Добровольский и Чарльз Браун. Об этом событии более подробно написано в журнале «Электричество» [21]. (*Окончание следует.*)

*Беспалов В.Я., Бородин Д.А., Бородин В.Д.*