АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,
д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com

Передача электричества на дальние расстояния стала реальностью только после того, как Марсель Депре доказал на практике необходимость использования в линии высокого напряжения. Он также внес большой вклад в развитие электроизмерительной техники и электромеханики, введя, в частности, понятие «перемещающегося» магнитного поля, лежащего в основе современных асинхронных двигателей. Статья посвящена 175-летию со дня рождения этого ученого и 100-летию со дня кончины.

МАРСЕЛЬ ДЕПРЕ — УЧЕНЫЙ, РЕАЛИЗОВАВШИЙ ИДЕЮ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Великий французский электротехник Марсель Депре (Marcel Deprez, рис. 1) родился 29 декабря 1843 г. на ферме коммуны Айан-сюр-Мильрон в центре Франции [1–3].

После окончания лицея он отправился в Париж и поступил в Высшую политехническую школу, а затем, в 1865 г., в Высшую горную школу. Юного Марселя больше привлекали различные опыты, чем учеба, поэтому диплома он так и не получил. Зато его экспериментаторские наклонности привлекли внимание директора горной школы, члена парижской Академии наук Шарля Комба (Charles Combes), который взял Депре в 1866 г. к себе секретарем и предоставил ему возможности для научной работы. Первые исследования Депре относились к паровым машинам. Ему удалось улучшить характеристики золотникового механизма и регулятора скорости Уатта и в результате снизить расход топлива. И уже в 1867 г. заметка об этой работе была представлена в парижскую Академию наук.

Во время франко-прусской войны 1870–1871 гг. Депре служил в корабельной артиллерии, участвовавшей в обороне Парижа [3]. Там ему представилась возможность изучить процесс, происходящий внутри жерла орудия при выстреле, и проследить изменение давления пороховых газов от времени. Эта работа занимала его почти десять лет и потребовала создания быстродействующего регистратора давления (хронографа), поскольку выстрел длился не более 10 мс. Хронографы с вращающимся барабаном были разработаны еще Уитстоном, Константиновым и другими учеными, но они использовались для измерения скорости полета снаряда, время которого исчислялось секундами. Депре удалось создать электромагнитное перо с быстродействием в доли мс [2]. За изучение процессов, происходящих в паровой

РИС. 1. ◄
Марсель Депре (1843–1918)

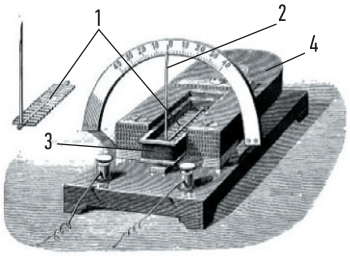

РИС. 2. ▶
Гальванометр Депре

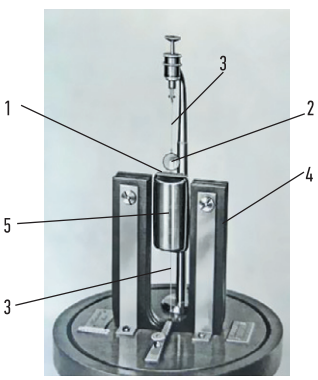

РИС. 3. ▶
Гальванометр Депре — Д'Арсонваля

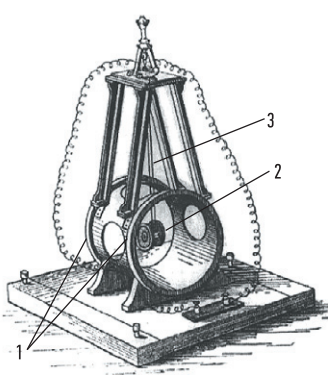

РИС. 4. ▶
Электродинамометр Вебера

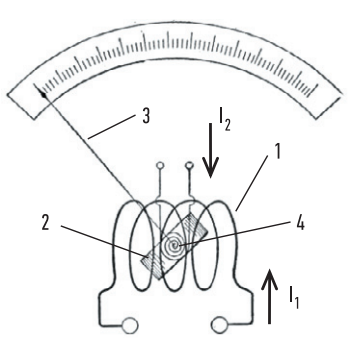

РИС. 5. ▶
Схема электродинамометра Вебера

машине и дуле орудия (баллистике), ему были присуждены премии парижской Академии наук за 1876 и 1878 гг. [3].

В конце 1870-х гг. Депре всерьез увлекся электричеством. Одна из его главных заслуг в этой области — создание новых электроизмерительных приборов, в том числе гальванометра и амперметра, ваттметра, приборов для измерения сопротивления, коэффициента самоиндукции, гистерезиса. Многие из этих устройств потом выпускались фирмой «Карпантье» [3, 4]. В то время приборы строились на основе весов Кулона и магнитной стрелки в поле тока, предложенной Ампером [5]. Стремясь отказаться от магнитной стрелки, Депре создал в 1879 г. токовый прибор, называемый гальванометром «с рыбной костью» (рис. 2) [4].

Название прибора объясняется подвижной рамкой (1) в виде сетки из магнитомягкой стали в форме рыбной кости, с которой соединен указатель (2). Рамка размещена внутри неподвижной обмотки (3) с измеряемым током, расположенной между полюсами постоянного магнита (4). Плоскость рамки устанавливается по направлению суммарного магнитного потока, что позволяет определить величину тока. Введение постоянного магнита исключало влияние всех внешних магнитных полей, в том числе и поля Земли.

В начале 1880-х гг. французский физиолог Жак-Арсен д'Арсонваль (Jacques-Arsène d'Arsonval), впоследствии ставший членом парижской Академии наук и создавший метод лечения токами высокой частоты (дарсонвализацию), изучал, подобно Гальвани, физиологические токи лапки лягушки. Для этого он пытался использовать гальванометр Депре, однако затем ему пришла в голову счастливая мысль отказаться от «рыбной кости» и сделать обмотку подвижной, что и позволило ему совместно с Депре разработать в 1881 г. прибор, названный гальванометром Депре — Д'Арсонваля [4, 6]. Это был, в сущности, обращенный гальванометр Ампера, в котором подвижный магнит (стрелка) и неподвижная обмотка были заменены неподвижным магнитом и подвижной обмоткой (рис. 3).

В этом приборе прямоугольная рамка (1) из склеенных проводников с зеркальцем (2) подвешена на серебряных подводящих проводах (3) (обеспечивающих также восстанавливающий момент) в поле мощного подковообразного магнита (4) с магнитомягким сердечником (5), существенно повышающим магнитный поток. Данный гальванометр послужил прообразом всех по сей день существующих магнитоэлектрических измерительных приборов. Впрочем, его прототипы можно найти еще в устройствах Максвелла, Уильяма Томсона и даже Ампера [5, 6].

Другой известный прибор Депре — для измерения мощности электрического тока (ваттметр) — был создан на основе электродинамометра Вебера [6]. Знаменитый немецкий физик Вильгельм Вебер (Wilhelm Weber) вместе с величайшим математиком Карлом Гауссом (Carl Gauß) исследовал в Геттингенском университете геомагнетизм. В этой команде Гаусс был теоретиком, а Вебер — экспериментатором, разработавшим много научных приборов. Их имена навсегда остались в истории электротехники в названиях единиц: магнитной индукции в системе СГС (гаусс) и магнитного потока в системе СИ (вебер). Электродинамометр Вебера, созданный в 1846 г., содержит две взаимно перпендикулярные двухсекционные катушки — неподвижную (1) и подвижную (2), подвешенную на упругом подвесе (3) (рис. 4).

Принцип действия прибора поясняется на рис. 5, где упругий подвес заменен пружинами (4), подводящими ток. При наличии токов I_1 и I_2 магнитные потоки катушек, направленные вдоль их осей, стремятся повернуть подвижную катушку (2) до совмещения с плоскостью катушки 1. При этом в соответствии с законом Ампера вращающий момент M определяется как $M = k_м \times I_1 \times I_2$, где $k_м$ — конструктивный коэффициент момента. Если катушки включить последовательно, то вращающий момент, а следовательно, и угол отклонения стрелки (3) будет пропорционален квадрату измеряемого тока. Приборы подобного типа теперь называются логометрическими.

Для измерения потребляемой мощности Депре предложил подавать ток потребления на обмотку 1, а напряжение нагрузки — на обмотку 2.

Внешний вид измерителя, запатентованного в 1881 г., показан на рис. 6, где уравновешивающий момент создается маятником (5) [4].

Однако имя Марселя Депре стало широко известным лишь после того, как ему впервые удалось передать значительное количество электроэнергии на большое расстояние с помощью высоковольтных линий [2, 3, 7–9]. Повсеместное использование телеграфной связи несомненно подтверждало возможность трансляции электрического тока на тысячи километров. Однако попытка увеличения тока приводила к резкому возрастанию потерь в линии.

Например, демонстрация французским электриком Ипполитом Фонтеном (Hippolyte Fontaine) в 1873 г. на выставке в Вене двух идентичных динамомашин в режимах генератора и двигателя, соединенных кабелем в 1 км, привела к резкому снижению мощности двигателя.

Из закона Джоуля — Ленца следовало, что потери в линии обратно пропорциональны сечению провода и квадрату передаваемого напряжения [7]. В 1874 г. русский военный инженер Федор Аполлонович Пироцкий проводил успешные опыты по передаче электроэнергии через железнодорожные рельсы. Другой, более перспективный путь снижения потерь в линии путем повышения напряжения был теоретически обоснован в 1880–1881 гг., почти одновременно, профессором Петербургского лесного института Дмитрием Александровичем Лачиновым и Марселем Депре [7, 9]. При этом последний подтвердил справедливость своих выводов с помощью стенда на первой электротехнической выставке в Париже в 1881 г., содержащего осветительные лампы и 27 различных станков с электродвигателями, подключенными кабелем в 1,8 км к генератору постоянного тока [2]. Окрыленный успехом, Депре уже в 1882 г. создает для электротехнической выставки в Мюнхене — совместно с ее устроителем и основателем знаменитого немецкого политехнического музея Оскаром Миллером (Oskar von Miller) — первую дальнюю линию электропередачи. Генератор в 3 л. с. напряжением 1,5 кВ на валу паровой машины в г. Мисбах был соединен обычной телеграфной линией в 57 км с электродвигателем на выставке [1–3, 7, 9]. На валу этого электродвигателя (рис. 7) был установлен водяной насос, который питал эффектный водопад, вызывавший восторг у всех посетителей. Однако КПД передачи не превышал 25%.

Столь низкий КПД дал повод для критики самой идеи. Однако Депре повторил эксперимент с тем же оборудованием на вокзале Парижа, показавший КПД в 48%. Затем, в 1883–1885 гг., при поддержке банкира Ротшильда он строит еще более мощные линии, уже на 6 кВ: Визиль — Гренобль длиной 14 км и Крейл — Париж на 56 км, с КПД 45%. В 1886 г. на аналогичной линии Фонтен достиг КПД 82% с использованием четырех последовательно включенных генераторов и электродвигателей по 1,5 кВ, что существенно повысило надежность оборудования. Вершиной всех этих экспериментов стала в 1906 г. линия швейцарского инженера Рене Тюри (René Thury) длиной 180 км и напряжением 57 кВ на мощность 8500 кВт. Возможность промышленной передачи электроэнергии была доказана [7].

Тем не менее при том уровне технологии использование высоковольтной передачи постоянного тока было ограничено. Высоковольтные машины часто выходили из строя из-за пробоя изоляции. Для систем освещения на приемном конце требовались понижающие электромашинные преобразователи. На электротехнической выставке в Париже в 1881 г. группа ученых, недовольная доминированием постоянного тока, организовала параллельную конференцию с упором на системы переменного тока на базе трансформатора француза Люсьена

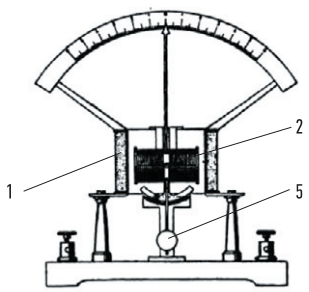

РИС. 6. ◄
Ваттметр Депре

Голара (Lucien Gaulard) и англичанина Джона Гиббса (John Gibbs) [2, 7, 8]. Некоторые критики считали, что успехи Депре произвели негативный эффект, затормозивший французские исследования по технике переменных токов [2]. В результате в начале электрификации большего успеха добились венгерская компания «Гейнц и Ко» с однофазной системой освещения, американская компания Вестингауза с двухфазной системой Теслы и немецкая «АЕГ» с трехфазной системой Доливо-Добровольского [7, 10].

Однако на самом деле Депре не был бескомпромиссным приверженцем линий передачи постоянного тока. В патенте 1892 г. он описал систему дальней передачи с двумя индукционными катушками Румкорфа на передающем и приемном концах (по сути, повышающего и понижающего трансформаторов), причем на передающей стороне катушка подключена к батарее через прерыватель (реле) в автоколебательном режиме [11]. В результате в линии создаются импульсы высокого напряжения, которые снижаются до низкого напряжения в приемной катушке.

РИС. 7. ◄
Демонстрация первой дальней линии электропередачи в Мюнхене

- Депре был разносторонним ученым и инженером: он прославился не только в области электроэнергетики, но и в электроизмерительной технике, электромеханике, паровых машинах и баллистике.
- Он построил первые дальние линии передачи электроэнергии и создал новые измерительные приборы (амперметры, ваттметры и многие другие).
- Депре изобрел первый линейный электродвигатель и сформулировал идею «поворачивающегося» магнитного поля, которая впоследствии привела к созданию первых асинхронных электродвигателей

Депре также занимался теорией и конструированием двигателей постоянного тока и разработал первый линейный электродвигатель, названный «молотом Депре» [1, 3, 12]. Работы Депре способствовали созданию асинхронных двигателей переменного тока. Считается, что первые двухфазные двигатели такого рода были предложены практически одновременно двумя учеными — Николой Тесла и итальянским профессором физики Галилео Феррарисом (Galileo Ferraris) — в 1887–88 гг. на основе концепции вращающегося магнитного поля [9, 10, 12]. Однако еще на парижской выставке 1881 г. Марсель Депре представил установку, созданную в 1879 г., для дистанционной передачи угля в опытный динамометрический вагон движения поршней паровой машины локомотива [10]. В ней две взаимно перпендикулярные катушки приемника в поле постоянного магнита поочередно возбуждались от датчика в виде коммутатора постоянного тока. Эту идею «поворачивающегося» магнитного поля Депре обосновал в 1883 г. в статье об «электрической буссоли» [9].

Заслуги Марселя Депре были достойно отмечены [1–3]. В 1883 г. он был произведен в кавалеры ордена Почетного легиона Франции, а в 1886 г. его избрали членом парижской Академии наук (Академии «бессмертных») в секции механики. Также одно из самых престижных учебных заведений Франции — Консерватория искусств и ремесел учредила в 1890 г. кафедру промышленного электричества, которая и была предложена Марселю Депре. Ему принадлежит более 60 научных работ, в основном опубликованных в трудах парижской Академии наук. ⬣

ЛИТЕРАТУРА

1. Complete dictionary of scientific biography. Detroit: Charles Scribner's Sons. V. 4. 2008.
2. Marcel Deprez. www.annales.org/archives/x/deprez.html.
3. Nécrologie. Notice sur M. Mabcel Deprez // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. T. 167. 1918.
4. Deprez M. Traite d'electricite industrielle. Electrometrie. Paris: Librairie politechnique Ch. Beranger. 1900.
5. Микеров А. Г. Первые электроизмерительные приборы // Control Engineering Россия. 2018. №2 (74).
6. Keithley J. F. The Story of Electrical and Magnetic Measurements: From 500 BC to the 1940s. New York: Wiley-IEEE Press. 1998.
7. Белкинд Л. Д. и др. История энергетической техники. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960.
8. Marcel Deprez. Raconte-moi la radio. www.leradiofil.com/DEPREZ.htm.
9. Цверава Г. К. Никола Тесла. Л.: Наука. 1974.
10. Микеров А. Г. Никола Тесла и передача электроэнергии переменным током // Control Engineering Россия. 2016. №5 (65).
11. Deprez M., Carpentier J. Transmission of electrical-energy to a distance. US patent 470865. 1892.
12. Микеров А. Г., Вейнмейстер А. В. История науки и техники в области управления и технических систем. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016.