



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

Переход в конце XIX в. к системам электрического освещения с централизованным электроснабжением вызвал массовое производство электроприборов как постоянного, так и переменного тока. Последние строились на новых принципах измерения теплового, электромагнитного, динамометрического, индукционного и электростатического действия тока.



ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НАЧАЛА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ



РИС. 1. ▶
Эдвард Вестон
(1850–1936)

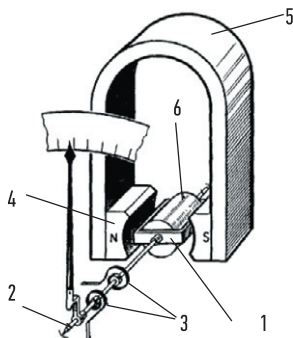


РИС. 2. ▶
Прибор Вестона

Первые лабораторные электроизмерительные приборы, описанные в [1], не годились для промышленного применения вследствие как своей хрупкости, так и трудоемкости процесса измерения. Начавшаяся в конце XIX в. электрификация, обусловленная масштабным производством, передачей и распределением электроэнергии, потребовала разработки мобильных, щитовых, стрелочных приборов, в том числе для измерения в цепях переменного тока и высокого напряжения [2].

Кроме того, наиболее совершенные по тем временам магнитоэлектрические приборы — например, Д'Арсонваля [1] — имели много эксплуатационных недостатков, таких как неудобный упругий подвес, указатель в виде зеркала, нестабильность доступных в то время постоянных магнитов и т. д. Человеком, которому удалось избавиться от этих недочетов и развернуть промышленное производство электрических измерительных приборов, был Эдвард Вестон (Edward Weston), американский химик и предприниматель (рис. 1) [3, 4].

Вестон родился в Англии и получил там начальное медицинское образование, откуда вынес любовь к химии. Увлечшись электричеством, он отка-

зался от медицинской карьеры, уехал в США и организовал успешное гальваническое предприятие, на котором наладил производство динамомашинок, вытеснивших дорогостоящие гальванические батареи. Однако свое призвание Вестон нашел в измерительной технике. В 1888 г. он запатентовал магнитоэлектрический измеритель (рис. 2), в котором проволоочная обмотка на медной рамке (1) с осью (2) подвешивалась горизонтально на двух подводящих ток спиральных часовых пружинах (3) в зазоре между наконечниками (4) постоянного магнита (5) и магнитомягким сердечником (6).

Помимо полюсных наконечников, спиральных пружин и металлической рамки, которая не только обеспечивала прочность, но и улучшала демпфирование стрелочного механизма за счет вихревых токов, Вестон внес в прибор Д'Арсонваля и другие улучшения. Он применил часовые ювелирные подпятники оси, зеркальную шкалу, а также разработанный им особо стабильный материал магнита. Прибор оказался практичным, мобильным и чувствительным, отчего был назван милливольтметром, хотя с применением шунтов мог использоваться и как амперметр.

Для провода шунтов Вестон избрал термостабильные сплавы, которые под названиями «константан» и «манганин» стали производиться в Германии. Он также разработал ряд приборов переменного тока и стабильный гальванический элемент, принятый в 1908 г. в качестве международного стандарта ЭДС (нормальный элемент Вестона), патентные права на который он передал в общественное пользование. Всего Вестон имел 334 патента США. В 1886 г. Вестон создал компанию Weston Electrical Instrument, специализировавшуюся на производстве приборов. К сожалению, эта крупнейшая и процветающая компания прекратила свою деятельность спустя 100 лет, в 1988 г. В Европе также были созданы подобные предприятия: французская Carpentier, немецкие Siemens & Halske, Hartmann & Braun и др. Первый отечественный завод «Электроприбор» был открыт в Ленинграде в 1927 г., для производства электросчетчиков. До этого измерительные приборы производились в Петербурге телеграфным заводом «Сименс-Гальске» (основанным в 1853 г.) и телефонным заводом Геслера (созданным в 1895 г.).

В 1880-х гг. Марсель Депре (Marcel Deprez) начал строительство первых дальних линий электропередачи постоянного тока с напряжением 6 кВ, которое к началу XX в. было доведено до 57 кВ [5]. Для измерения такого огромного напряжения потребовались электростатические приборы, которые восходят к весам Кулона и первому электрометру Вольты 1781 г. [1, 6]. Однако эти приборы для измерения зарядов могли служить скорее индикаторами напряжения. В 1853 г. знаменитый английский физик Джеймс Томсон (лорд Кельвин) создал более совершенный электрометр на основе переменного конденсатора (рис. 3), содержащего неподвижные обкладки (1) и подвешенный на упругой нити (3) лепесток (2) [7]. При приложении напряжения электростатическая сила, пропорциональная его величине, стремится втянуть лепесток до положения максимальной емкости конденсатора.

Пригодный для промышленного использования образец такого прибора 1880-х гг., названный кельвинметром, показан на рис. 4 [7]. В данном случае чувствительный элемент (1) содержит несколько секций пере-

менного конденсатора со стрелочным указателем. Упругий подвес, который может быть заменен спиральной пружиной, расположен в верхней части (2), тогда как в нижней части (3) находится жидкостный демпфер.

В отличие от магнитоэлектрических приборов электростатические подходят и для переменного тока. Однако в системах электроснабжения переменного тока, постепенно вытеснивших системы постоянного тока Эдисона, большее распространение нашли тепловые, электромагнитные или электродинамические измерители [3, 4, 7].

В 1837 г. швейцарский физик Огюст де ла Рив (Auguste de la Rive) продемонстрировал измеритель, использующий эффект удлинения проводника за счет нагрева проходящим по нему электрическим током любой формы [3]. Огюст де ла Рив (1801–1873) родился в Женеве в семье врача и профессора химии. В возрасте 22 лет он занял кафедру физики и вошел в историю благодаря работам по электричеству, термодинамике и оптике, а также тому, что организовал общество конструкторов научных приборов.

На том же эффекте удлинения проводника был основан и первый коммерческий тепловой прибор, созданный в 1885 г. английским военным инженером Филипом Кардью (Philip Cardew) (1851–1910), известным также своими изобретениями в телеграфии, электрификацией железных дорог и использованием электричества в военном деле. Прибор Кардью (рис. 5) содержал тонкий платино-серебряный провод (1) диаметром 0,06 мм и длиной более 2 м, пружину (2) и указатель (3) [3, 7]. Шкала прибора неравномерная, потому что температура провода пропорциональна количеству выделившегося тепла, определяемого квадратом проходящего электрического тока. Дальнейшие усовершенствования позволили уменьшить длину проволоки до 17 см.

Хотя электромагнит был изобретен английским ученым Уильямом

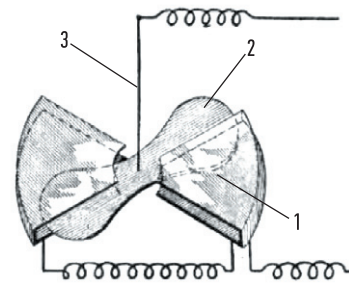


Рис. 3. ◀
Электрометр Томсона

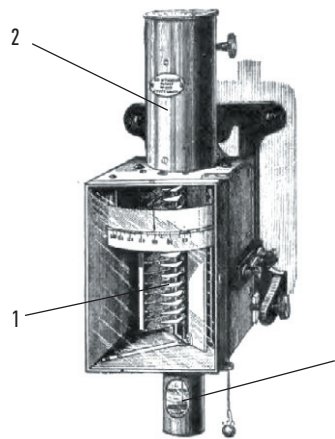


Рис. 4. ◀
Кельвинметр

Стерженом (William Sturgeon) еще в 1825 г., коммерческий электромагнитный измерительный прибор был создан лишь в 1884 г. Фридрихом Кольраушем (Friedrich Kohlrausch, 1840–1910 гг.), профессором физики в различных немецких университетах, ставшим после смерти Германа Гельмгольца директором Физико-технического института в Берлине [3]. Он известен своими работами по электролитам, а также благодаря созданию большого числа прецизионных измерительных приборов и стандартов. Прибор Кольрауша (рис. 6) содержал цилиндрический электромагнит, сердечник которого с указателем подвешивался на пружине [7]. Тяговое усилие электромагнита пропорционально квадрату как постоянного, так и переменного тока, поэтому шкала прибора также неравномерная.

Однако самыми точными, хотя и дорогими, приборами переменного

Рис. 5. ▼
Прибор Кардью

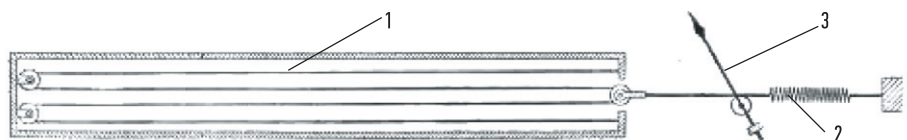




РИС. 6. ◀
Прибор Кольрауша

го тока до сих пор являются электродинамометры. Прибор такого типа, основанный на взаимодействии подвижной и неподвижной обмоток с током, был предложен знаменитым немецким физиком Вильгельмом Вебером (Wilhelm Weber) в 1846 г. для исследования геомагнетизма [4, 5]. Для измерения больших токов применялся электродинамометр Сименса, созданный в 1883 г. [3, 4, 7]. Однако он скорее подходил для лабораторных условий, поскольку в его состав входили ртутные контакты подвижной обмотки и торсионный подвес. Более практичным оказался прибор Вестона 1891 г. (рис. 7) с обмотками неподвижной (1), подвижной (2), спиральными пружинами (4), подводщими ток, и стрелкой (5) [4, 7].

В 1881 г. Марсель Депре предложил использовать электродинамометр в качестве ваттметра, т. е. измерителя потребляемой мощности [5]. Для этого одна из обмоток с малым сопротивлением включалась в цепь нагрузки, а вторая, с большим сопротивлением, — параллельно нагрузке. При таких условиях отклонение стрелки логометра пропорционально потребляемой мощности.

С широким внедрением электрического освещения сразу возникла проблема оплаты потребляемой электроэнергии [2, 8, 9]. В первой системе

РИС. 7. ▶
Электродинамометр Вестона

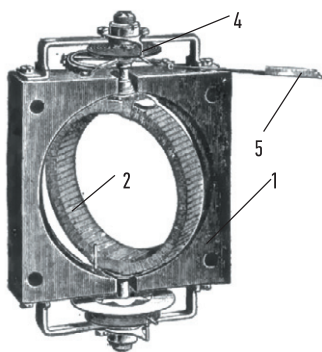
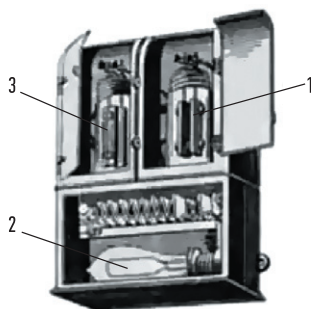


РИС. 8. ▶
Счетчик Эдисона



электропитания постоянного тока Эдисона электричество первоначально отпускалось бесплатно, потребитель только оплачивал лампы накаливания. Это делалось для того, чтобы привлечь сторонников популярного тогда газового освещения. Затем была введена оплата по числу используемых ламп. Но однажды известный банкир Джон Морган (John Morgan), финансировавший систему Эдисона и первый осветивший свой офис на Уолл-стрит его лампами, пожаловался на несправедливость такого тарифа, поскольку большая часть установленных ламп ночами не включалась. Эдисон признал претензию обоснованной и изобрел первый электролитический счетчик (рис. 8) [9]. Он содержал электролитическую ванночку (1) с двумя

медными электродами, включенными последовательно в цепь потребления. Прибор имел также систему поддержания температуры электролита с лампой (2) для подогрева и сменную ванночку (3).

В соответствии с законом электролиза Фарадея, количество меди, перенесенное с анода на катод, пропорционально величине прошедшего электричества [6]. Поэтому оплата электроэнергии производилась путем взвешивания электродов, которые нужно было регулярно относить в контору Эдисона. Это было крайне неудобно, поэтому применялись и другие счетчики постоянного тока, например Элиу Томсона (Elihu Thomson) с коллекторным электродвигателем [7, 8]. Щеточно-коллекторный узел такого двигателя требовал ухода и имел ограниченный срок службы. Однако все эти счетчики оказались непригодными уже в 1890-е гг. в связи с повсеместным переходом на системы электропитания переменного тока [2].

Пионером электрического освещения однофазным переменным током в Европе была компания Ganz в Будапеште, сотрудник которой, известный венгерский электротехник и соавтор изобретения трансформатора Отто Блати (Otto Bláthy), создал в 1889 г. первый электросчетчик переменного тока, также запатентованный в США (рис. 9) [8].

В 1894 г. аналогичный счетчик, называемый теперь индукционным, был разработан для компании Westinghouse Оливером Шелленбергером (Oliver Shallenberger) [7, 8]. Идею индукционного счетчика, мало изменившуюся за прошедшие годы, иллюстрирует рис. 10.

На этой схеме: 1 — металлический вращающийся диск, 2 — электромагнит напряжения, включенный параллельно сети, 3 — электромагнит тока, включенный последовательно с нагрузкой, 4 — тормозной постоянный магнит, 5 — счетчик числа оборотов диска. Электромагниты напряжения и тока вместе с диском представляют собой классический двухфазный асинхронный двигатель, в котором вращающееся магнитное поле образуется благодаря выполнению двух условий Феррариса [10]: перпендикулярности потоков, создаваемых двумя обмотками электромагнитов (что видно на рис. 10), и сдвига фаз питающих напряжений обмоток на четверть

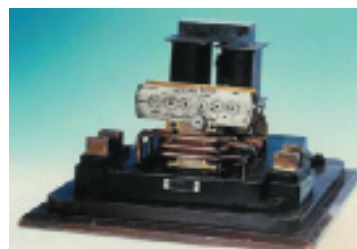
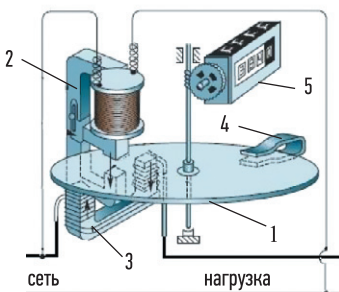


РИС. 9. ◀
Индукционный счетчик Блати

РИС. 10. ▶
Индукционный счетчик



периода. Последнее достигается за счет высокой индуктивности обмотки напряжения с большим числом витков и ничтожной индуктивности обмотки тока с малым числом витков.

Тогда, в соответствии с теорией асинхронного двигателя, развиваемый им вращающий момент будет равен: $M_b = k_M \times U \times I \times \cos\varphi$, где U и I — действующие значения напряжения и тока потребления, φ — сдвиг фаз между ними, вносимый нагрузкой. Нетрудно убедиться, что выражение $U \times I \times \cos\varphi$ — это активная мощность, потребляемая нагрузкой. Если учесть, что уравновешивающий тормозной момент, создаваемый постоянным магнитом (4), пропорционален частоте вращения диска (9) и (напри- мер, в об/мин) $M_T = k_T \times n$, то частота вращения диска n пропорциональна потребляемой мощности. Таким образом, счетчик (5) показывает величину потребляемой электро- энергии, например в кВт·ч за задан- ный промежуток времени.

Первый счетчик Блати был очень тяжелым (23 кг), но уже в начале XX в. его вес снизился почти на поряд- ок. Существенно улучшились и все остальные приборы переменного тока,

что и способствовало широкой электри- фикации [3, 8]. Дальнейшее развитие электроизмерительной техники связано уже с появлением электроники. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеров А. Г. Первые электроизмерительные приборы // Control Engineering Россия. 2018. №2 (74).
2. Минеров А. Г. Война токов и победа переменного тока // Control Engineering Россия. 2017. №2 (68).
3. История электротехники / Под ред. И. А. Глебова. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
4. Keithley J. F. The Story of Electrical and Magnetic Measurements: From 500 BC to the 1940s. New York: Wiley-IEEE Press, 1998.
5. Минеров А. Г. Марсель Делпре — ученый, реализовавший идею транспорта электроэнергии (к 175-летию со дня рондения и 100-летию со дня кончины) // Control Engineering Россия. 2018. №3 (75).
6. Минеров А. Г., Вейнмейстер А. В. История науки и техники в области управления и технических систем: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016.
7. Roller F.W. Electric and magnetic measurements and measuring instruments. New York: McGraw publishing company, 1907.
8. The history of the electricity meter. www.metering.com/features/the-history-of-the-electricity-meter/.
9. Шнейберг Я. А. Король изобретательства и «сверхчеловек» Томас Альва Эдисон. www.ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=20197.
10. Минеров А. Г. Появление электродвигателей переменного тока // Control Engineering Россия. 2017. №1 (67).

- Первым массовым измерителем постоянного тока стал магнитоэлектрический прибор Вестона (1888 г.), сохранившийся в основных чертах до наших дней.
- Для высоковольтных линий электропередачи наиболее подходящими оказались электростатические приборы, первый из которых был создан Джозефом Томсоном в 1853 г.
- При электрификации переменным током потребовались приборы других систем. Среди первых были амперметры: тепловой (Кардью, 1885 г.), электромагнитный (Кольрауш, 1884 г.), а также электродинамометр Вестона (1891 г.).
- Для оплаты потребляемой электроэнергии в системе постоянного тока Эдисон изобрел электролитический счетчик, а в системах переменного тока использовался индукционный счетчик Блати (1889 г.), до сих пор практически не изменившийся.