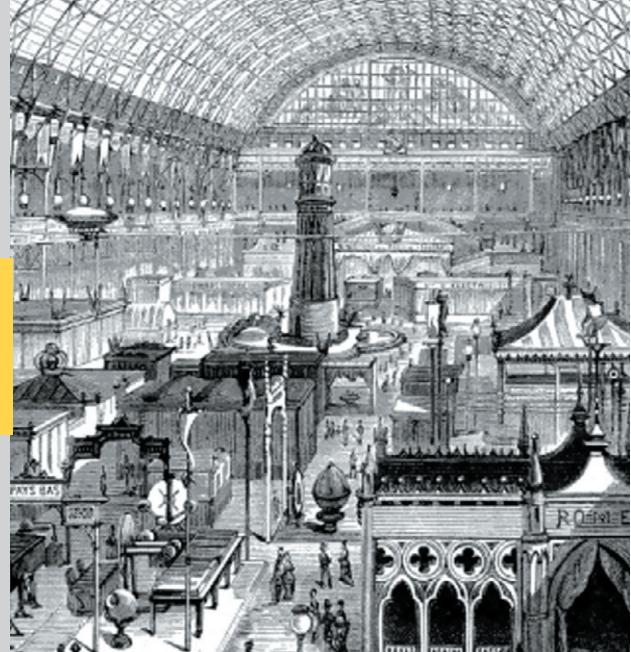




**АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,**  
д. т. н., проф. каф.  
систем автоматического управления  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
[a.mikerov@gmail.com](mailto:a.mikerov@gmail.com)

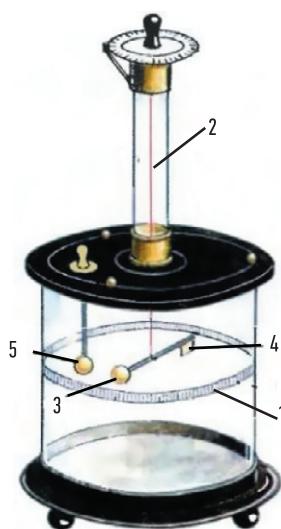
Первые приборы для измерения электрических зарядов, сопротивления и тока — гальванометры — были созданы еще в конце XVIII в. Позже они также стали использоваться как приемники телеграфных линий.



## ПЕРВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ



**РИС. 1. ►**  
Шарль Кулон (1736–1806)



**РИС. 2. ►**  
Весы Кулона

Дмитрий Иванович Менделеев писал: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять: точная наука немыслима без меры». И действительно, развитие науки и техники всегда сопровождается созданием новых приборов, без которых невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть выявленные законы и гипотезы. А иногда наоборот, изобретение измерительного устройства может привести к открытию важнейшего физического закона.

Именно так произошло с законом взаимодействия электрических зарядов, положившим начало электростатике. Его открыл знаменитый французский военный инженер Шарль Кулон (Charles-Augustin de Coulomb, рис. 1) [1–3].

До него величину заряда оценивали приблизительно, на глазок. Например, Ломоносов определял ее по цвету искр при разряде: слабо голубой, явно голубой, красноватый, вишневый и т. д. Аналогичные способы базировались на силе ощущения при электрическом разряде через палец. Впоследствии в одном из первых телеграфных приемников оператор закорачивал пальцем два приемных контакта, воспринимая длинные и короткие сигналы в линии «физиологического телографа». Лучшую оценку давали электроскопы, но это были скорее индикаторы, чем измерительные приборы [1, 2].

Кулон занимался измерениями суточной девиации магнитного поля Земли, для чего использовал

магнитную стрелку на торсионном подвесе. Пытаясь снизить погрешности, он изучил свойства таких подвесов и установил строгую пропорциональность между силой и углом закручивания металлической нити. И в результате изобрел чувствительнейший измеритель весьма малых механических сил, называемый теперь весами Кулона. Он использовал эти весы в 1784 г. при установлении своего знаменитого закона для силы взаимодействия  $f_C$  между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ :

$$f_C = (k_C \times q_1 \times q_2) / R^2,$$

где  $R$  — расстояние между зарядами, а  $k_C$  — постоянная Кулона. Прибор для измерения сил отталкивания одноименных зарядов (рис. 2) содержал стеклянный цилиндр диаметром 32 см со шкалой (1), серебряную струну (2), коромысло с заряженным шариком (3) и противовесом (4), а также неподвижный заряженный шарик (5). Сила отталкивания заряженных шариков определялась по углу закручивания струны. Для измерения сил притяжения разноименных зарядов использовалась другая конструкция [2].

Чувствительность весов Кулона была доведена до фантастической величины в  $3 \times 10^{-6}$  мг/град шкалы — до сих пор недостижимой другими методами измерения. Кулон был избран в Парижскую Академию наук, а его имя увековечено в названии единицы заряда в системе SI — 1 кулон.

Спустя более 30 лет, в 1820 г., весы Кулона были применены в первом измерителе силы тока членом Парижской Академии наук Андре-Мари Ампером (André-Marie Ampère), который назвал свой прибор «гальванометром», поскольку электрические токи тогда носили название гальванических [1, 2, 4]. При его создании Ампер использовал эффект влияния электрического тока на магнитную стрелку, продемонстрированный незадолго до этого профессором физики из копенгагенского университета Гансом Эрстедом (Hans Ørsted), — хотя до него этот эффект наблюдал итальянский ученый Джованни Романьози (Giovanni Romagnosi) еще в 1802 г. Первый гальванометр (рис. 3) имел магнитную стрелку (1), размещенную над проводником с током (2) на упругом подвесе (3). Угол отклонения стрелки определялся величиной проходящего тока  $i$ .

С помощью такого прибора Ампер установил знаменитый закон, носящий его имя, который определяет механическую силу  $f_A$ , приложенную к проводнику с током длиной  $l$ , находящемуся в магнитном поле с индукцией  $B$ :

$$f_A = B \times l \times i.$$

Научный вклад Ампера всемирно признан. Единица тока, названная ампер, входит в число четырех основных единиц международной системы SI: наравне с метром, килограммом и секундой. В честь Ампера в его родном городе Лионе открыт музей и воздвигнут памятник.

Однако недостатки первого гальванометра были очевидны: низкая чувствительность, влияние магнитного поля Земли (отчего проводник с током необходимо было ориентировать по магнитному меридиану), а также воздушные возмущения [2, 4]. Чувствительность прибора была многократно повышена в том же 1820 г. в «мультиплексоре» профессора университета Галле (Германия) Иоганна Швейгера (Johann Schweigger), поместившего магнитную стрелку (1) внутрь катушки (2) с измеряемым током (рис. 4). А чтобы исключить влияние магнитного поля Земли, Ампер предложил сделать гальванометр астатическим и использовать две стрелки.

Эти и другие усовершенствования воплотились в астатическом гальванометре, созданном в 1825 г. профессо-

ром физики из Флоренции Леопольдо Нобили (Leopoldo Nobili) (рис. 5). В стеклянной колбе на упругой нити (1) были подвешены, в соответствии с идеей Ампера, две параллельные магнитные стрелки: одна (2) над шкалой, а другая (3) внутри измерительной катушки Швейгера (4).

Обе стрелки были намагнечены в противоположных направлениях, поэтому магнитное поле катушки действовало на них в одну сторону, а магнитное поле Земли — в разные, что исключало его влияние на показания. Это был наиболее чувствительный по тем временам прибор, позволивший измерять слабые термоэлектрические и физиологические токи человека и животных и заменивший лапки лягушек Гальвани. Гальванометр Нобили широко использовался вплоть до конца XIX в. Это был уникальный лабораторный прибор, в котором большое значение придавалось даже внешней отделке [2, 4].

Гальванометр был также применен для измерения другой важной электрической величины — сопротивления [1–3, 5]. Назвать ее так предложил немецкий школьный учитель Георг Ом (Georg Ohm). Он провел тщательные исследования электрической цепи с батареей, нагруженной резистором  $R$ , которые привели к открытию в 1826 г. его знаменитого закона:

$$i = u / R,$$

где  $u$  — напряжение на зажимах батареи,  $i$  — ток, текущий в цепи.

Однако первоначальные опыты с гальваническим элементом, нагруженным длинным проводом, привели Ома к ошибочному заключению о логарифмической зависимости тока в цепи от длины провода [2, 5]. Сейчас мы можем объяснить эту неудачу нестабильностью гальванических элементов, а также влиянием неизвестных в то время факторов: внутреннего сопротивления элемента и зависимости сопротивления провода от его нагрева током. Тогда же немецкий физик Иоганн Потгендорф (Johann Poggendorff), опубликовавший первые результаты Ома в своем журнале, посоветовал ему заменить гальванический элемент термоэлектрическим, открытым в 1821 г. немецким физиком Томасом Зеебеком (Thomas Seebeck) из Ревеля (теперь Таллинн). Последний экспериментально установил, что биме-

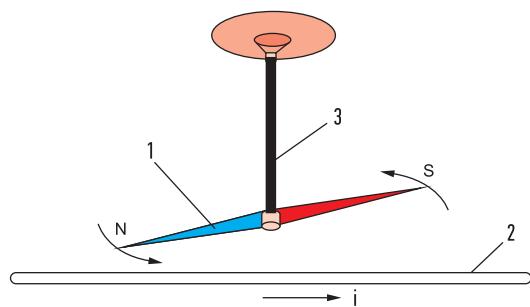


Рис. 3. Гальванометр Ампера

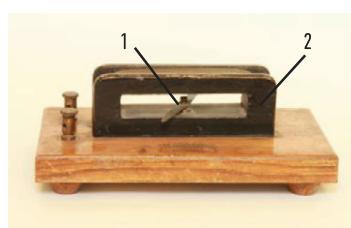


Рис. 4. Мультиплексор Швейгера

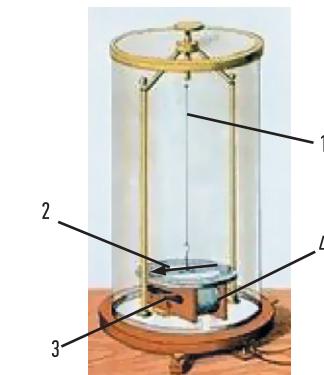


Рис. 5. Гальванометр Нобили

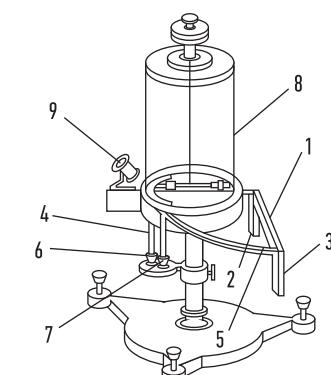


Рис. 6. Прибор Ома



РИС. 7. ▶  
Прибор Беккереля

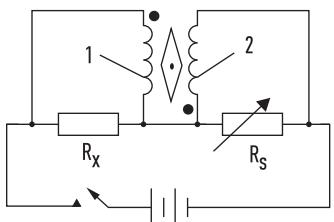
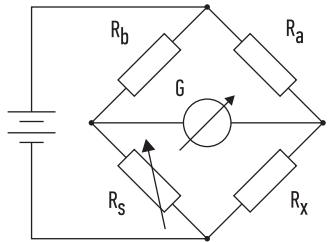


РИС. 8. ▶  
Мост Уитстона



ниже ЭДС гальванического элемента, что исключало нагрев проводника. В результате Ом создал сложнейший по тем временам измерительный прибор (рис. 6) [3].

Он содержал: П-образную пластину (1) из висмута, к двум коленам (2 и 3) которой были припаяны мед-

ные проводники (4 и 5), опущенные в чашечки (6 и 7) с ртутью. К этим чашечкам подключался не показанный на рисунке испытуемый провод. Над проводником 4 размещался гальванометр Ампера (8), показания которого считывались через окуляр (9). Одно из колен со спаем охлаждалось тающим льдом (опыты проходили в январе), а другое опускалось в кипящую воду. Таким образом, контактная разность температур строго поддерживалась на уровне +100 °C. С немецкой педантичностью Ом провел многочисленные измерения и установил, что величина тока в проводе обратно пропорциональна его сопротивлению, определяемому материалом, длиной и сечением. В честь первооткрывателя закона единица сопротивления в системе SI была позднее названа 1 Ом, а приборы для его измерения — омметрами. Однако при жизни Ома его закон не был признан из-за кажущейся простоты формулировки и сравнительной трудности проверки. Ом занял кафедру физики университета Мюнхена, о которой всю жизнь мечтал, лишь за два года до смерти [2]. Всю жизнь он нуждался и не мог даже завести семью.

Метод Ома был весьма трудоемким, что побудило исследователей искать другие способы измерений [5]. Еще в 1825 г. французский ученый Антуан Сезар Беккерель (Antoine César Becquerel), внук которого вследствии стал нобелевским лауреатом за открытие радиоактивности, предложил так называемый «нуль-метод» (рис. 7). В нем измеряемое сопротивление  $R_x$  сравнивалось с неким эталонным  $R_s$  [4].

Напряжения на сопротивлениях подавались на дифференциальный гальванометр с двумя катушками (1 и 2), намотанными в противоположных направлениях. Таким образом, нулевое положение стрелки означало точное равенство сравниваемых сопротивлений. Преимуществом метода, помимо простоты, было также устранение влияния нестабильности гальванического элемента.

Другим измерителем сопротивления стал мост Уитстона, названный в честь английского физика и изобретателя Чарльза Уитстона (Charles Wheatstone). В данном случае использовался обычный гальванометр  $G$ , включенный в диагональ моста (рис. 8). При равенстве добавочных сопротивлений  $R_a$  и  $R_b$  условием нулевого тока гальванометра является равенство измеряемого ( $R_x$ ) и эталонного ( $R_s$ ) сопротивлений.

Однако фактическим изобретателем этой схемы был преподаватель военной академии в Булвиче (Англия) Самюэл Кристи (Samuel Christie), который опубликовал описание этого метода в 1833 г. [5]. К сожалению, работа Кристи была написана настолько невразумительно, что прибор стал известен лишь в 1843 г., уже после публикации Уитстона, который хоть и указал на приоритет Кристи, но остался в литературе как создатель этого моста — до сих пор весьма популярного.

Первое практическое применение гальванометр нашел еще в 1830-х гг. — в качестве телеграфного приемника аппаратов Уитстона и Павла Львовича Шиллинга, а также телографа Карла Гаусса (Carl Gauss) и Вильгельма Вебера (Wilhelm Weber) [2, 6]. По мере того как росла протяженность телеграфных линий, чувствительности известных гальванометров уже не хватало. Особенно для первого трансатлантического кабеля между Ирландией и Ньюфаундлендом (Канада) длиной около 4500 км, идея которого возникла в США и Англии в середине XIX в. после создания Вернером Сименсом технологии изоляции кабеля гуттаперчей [7]. К решению проблемы был привлечен знаменитый английский ученый Уильям Томсон (William Thomson), в течение 53 лет занимавший кафедру физики университета Глазго, известный работами по термодинамике и электродинамике и называемый также отцом точных электрических измерений (рис. 9) [2, 4, 8].

Приняв RC-модель длинной линии, Томсон теоретически показал, что ее быстродействие определяется электрической постоянной времени (пропорциональной квадрату длины линии) и электромеханической постоянной времени гальванометра (пропорциональной моменту инерции подвижной части). Это помогло ему сконструировать зеркальный гальванометр (1) (рис. 10): подвижная часть массой всего 65 мг представляла собой магнит на шелковой нити с приклеенным зеркальцем, луч от которого перемещался по удаленной шкале (2). Зеркальце подсвечивалось лампой (3). Для обеспечения демпфирования подвижная часть

РИС. 9. ▶  
Уильям Томсон  
(1824–1907)

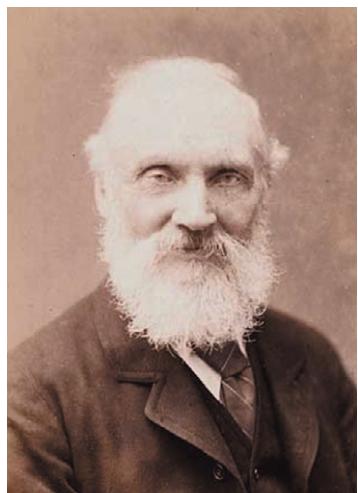
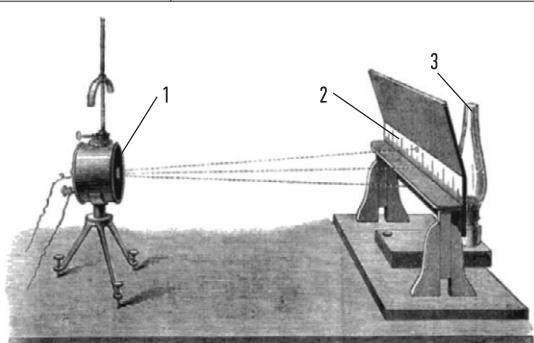


РИС. 10. ▼  
Гальванометр Томсона



помещалась в герметичный стеклянный цилиндр регулируемого объема воздуха. Гальванометр мог измерять ничтожные токи до  $2 \times 10^{-11}$  А.

Несмотря на это, передача первой телеграммы в 98 слов, которую послала английская королева в США в 1858 г., заняла более 16 часов. Из-за обрывов кабеля линия была окончательно проложена лишь с пятой попытки — в 1866 г., с помощью крупнейшего по тем временам парохода Great Eastern. Королева посвятила Уильяма Томсона в рыцари, а позднее пожаловала ему титул лорда Кельвина. Для ускорения передачи телеграмм Томсон изобрел пишущий гальванометр, а затем и струйный принтер, в котором струя заряженных чернил отклонялась электростатическим полем. Для измерения сопротивления кабеля он использовал специальный мост, называемый теперь мостом Кельвина [5]. Помимо этого, Томсон создал много других прецизионных приборов, включая электрометры чувствительностью до 10 мВ, морской компас, звуковой глубиномер и др. Все они были запатентованы и приносили Томсону существенный доход. Также он внес огромный вклад в создание

Первые электроизмерительные приборы строились на двух простейших устройствах: весах Кулона и магнитной стрелке в поле тока.

- С помощью весов Кулона их автор открыл в 1784 г. закон взаимодействия электрических зарядов (закон Кулона).
- Самым совершенным токовым прибором начала XIX в. был гальванометр Нобили (1825 г.), основанный на эффекте Эрстеда. Впервые его использовал Ампер для измерения величины тока в проводнике.
- Измерению электрического сопротивления положил начало прибор Ома (1826 г.), созданный на базе источника термоЭДС. Однако в дальнейшем более популярным стал мост Уитстона (1843 г.).
- В середине XIX в. со строительством трансатлантических телеграфных линий началось практическое применение гальванометра как приемника сигналов. До высочайшего уровня чувствительности его довел Томсон, создавший также много других прецизионных приборов.

международной системы единиц измерения SI, в которой единица термодинамической температуры называется в его честь — кельвин ( $^{\circ}\text{K}$ ). ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минеров А. Г., Вейнмейстер А. В. История науки и техники в области управления и технических систем. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016.
2. Keithley J. F. The Story of Electrical and Magnetic Measurements: From 500 BC to the 1940s. New York: Wiley-IEEE Press. 1998.
3. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М: Мир. 1972.
4. [www.ru.wikipedia.org/wiki/Гальванометр](http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Гальванометр).
5. Hall H. P. A History of Impedance Measurements. [www.ietlabs.com/pdf/GenRad\\_History/A\\_History\\_of\\_Z\\_Measurement.pdf](http://www.ietlabs.com/pdf/GenRad_History/A_History_of_Z_Measurement.pdf).
6. Минеров А. Г. Зарождение электроавтоматики // Control Engineering Россия. 2017. №5 (71).
7. Минеров А. Г. Вернер Сименс — основатель европейской электроиндустрии (К 200-летию со дня рождения) // Control Engineering Россия. 2016. №6 (66).
8. MacDonald D. K. C. Faraday, Maxwell and Kelvin. New York: Anchor Books. 1964.