**Закон Ома**

Марио Льоцци

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Что такое проводник? Это чисто пассивная составная часть электрической цепи, отвечали первые исследователи. Заниматься его исследованием — значит попросту ломать себе голову над ненужными загадками, ибо только источник тока представляет собой активный элемент. Такой взгляд на вещи объясняет нам, почему ученые, по крайней мере до 1840 г., почти не проявляли интереса к тем немногим работам, которые проводились в этом направлении. Так, на втором съезде итальянских ученых, состоявшемся в Турине в 1840 г. (первый собирался в Пизе в 1839 г. и приобрел даже некое политическое значение), выступая в прениях по докладу, представленному Марианини, Де ла Рив утверждал, что проводимость большинства жидкостей не является абсолютной, «а скорее относительной и изменяется с изменением силы тока». А ведь закон Ома был опубликован за 15 лет до этого!

Среди тех немногих ученых, которые первыми стали заниматься вопросом проводимости проводников после изобретения гальванометра, был Стефано Марианини (1790—1866). К своему открытию он пришел случайно, изучая напряжение батарей. Он заметил, что с увеличением числа элементов вольтова столба электромагнитное воздействие на стрелку не увеличивается заметным образом. Это заставило Марианини сразу же подумать, что каждый вольтов элемент представляет собой препятствие для прохождения тока. Он делал опыты с парами «активными» и «неактивными» (т. е. состоящими из двух медных пластинок, разделенных влажной прокладкой) и опытным путем нашел отношение, в котором современный читатель узнает частный случай закона Ома, когда сопротивление внешней цепи не принимается во внимание, как это и было в опыте Марианини.

Георг Симон Ом (1789—1854) признавал заслуги Марианини, хотя его труды и не оказали Ому непосредственной помощи в работе. Ом вдохновлялся в своих исследованиях работой («Аналитическая теория тепла», Париж, 1822 г.) Жана Батиста Фурье (1768—1830)—одной из самых значительных научных работ всех времен, очень быстро получившей известность и высокую оценку среди математиков и физиков того времени. Ому пришла мысль, что механизм «теплового потока», о котором говорит Фурье, можно уподобить электрическому току в проводнике. И подобно тому как в теории Фурье тепловой поток между двумя телами или между двумя точками одного и того же тела объясняется разницей температур, точно так же Ом объясняет разницей «электроскопических сил» в двух точках проводника возникновение электрического тока между ними.

Придерживаясь такой аналогии, Ом начал свои экспериментальные исследования с определения относительных величин проводимости различных проводников. Применив метод, который стал теперь классическим, он подключал последовательно между двумя точками цепи тонкие проводники из различных материалов одинакового диаметра и изменял их длину так, чтобы получалась определенная величина тока. Первые результаты, которые ему удалось получить, сегодня кажутся довольно скромными.

Историки поражаются, например, тем, что по измерениям Ома серебро обладает меньшей проводимостью, чем медь и золото, и снисходительно принимают данное впоследствии самим Омом объяснение, согласно которому опыт проводился с серебряной проволокой, покрытой слоем масла, и это вводило в заблуждение относительно точного значения диаметра.

В то время имелось множество источников ошибок при проведении опытов (недостаточная чистота металлов, трудность калибровки проволоки, трудность точных измерений и т. п.). Важнейшим же источником ошибок была поляризация батарей. Постоянные (химические) элементы тогда еще не были известны, так что за время, необходимое для измерений, электродвижущая сила элемента существенно менялась. Именно эти причины, вызывавшие ошибки, привели к тому, что Ом на основании своих опытов пришел к логарифмическому закону зависимости силы тока от сопротивления проводника, включенного между двумя точками цепи.

После опубликования первой статьи Ома Поггендорф посоветовал ему отказаться от химических элементов и воспользоваться лучше термопарой медь — висмут, незадолго до этого введенной Зеебеком. Ом прислушался к этому совету и повторил свои опыты, собрав установку с термоэлектрической батареей, во внешнюю цепь которой включались последовательно восемь медных проволок одинакового диаметра, но разной длины. Силу тока он измерял с помощью своего рода крутильных весов, образуемых магнитной стрелкой, подвешенной на металлической нити. Когда ток, параллельный стрелке, отклонял ее, Ом закручивал нить, на которой она была подвешена, пока стрелка не оказывалась в своем обычном положении; сила тока считалась пропорциональной углу, на который закручивалась нить.

Ом пришел к выводу, что результаты опытов, проведенных с восемью различными проволоками, «могут быть выражены очень хорошо уравнением

X= a/ b+x,

где X означает интенсивность магнитного действия проводника, длина которого равна х, а а и b — константы, зависящие соответственно от возбуждающей силы и от сопротивления остальных частей цепи».

Условия опыта менялись: заменялись сопротивления и термоэлектрические пары, но результаты все равно сводились к приведенной выше формуле, которая очень просто переходит в известную нам, если X заменить силой тока, a —электродвижущей силой и b+x,—общим сопротивлением цепи.

Получив эту формулу, Ом пользуется ею для изучения действия мультипликатора Швейггера на отклонение стрелки и для изучения тока, который проходит во внешней цепи батареи элементов, в зависимости от того, как они соединены — последовательно или параллельно. Таким образом он объясняет (как это делается теперь в учебниках), чем определяется внешний ток батареи,— вопрос, который был довольно темным для первых исследователей.

Ом надеялся, что его экспериментальные работы откроют ему путь в университет, чего он так желал. Однако статьи прошли незамеченными. Тогда он оставил место преподавателя в кельнской гимназии и отправился в Берлин, чтобы теоретически осмыслить полученные результаты. В 1827 г. в Берлине он опубликовал свой главный труд «Die galvanische Kette, mathe-matisch bearbeitet» («Гальваническая цепь, разработанная математически»).

Эта теория, при разработке которой он вдохновлялся, как мы уже указывали, аналитической теорией теплоты Фурье, вводит понятия и точные определения электродвижущей силы, или «электроскопической силы», как ее называет Ом, электропроводности (Starke der Leitung) и силы тока. Выразив выведенный им закон в дифференциальной форме, приводимой современными авторами, Ом записывает его и в конечных величинах для частных случаев конкретных электрических цепей, из которых особенно важна термоэлектрическая цепь. Исходя из этого, он формулирует известные законы изменения электрического напряжения вдоль цепи.

Но теоретические исследования Ома также остались незамеченными, а если кто-нибудь и писал о них, то лишь для того, чтобы, высмеять «болезненную фантазию, единственной целью которой является стремление принизить достоинство природы». И лишь лет десять спустя его гениальные работы постепенно начали пользоваться должным признанием: в Германии их оценили Поггендорф и Фехнер, в России — Ленц, в Англии — Уитстон, в Америке — Генри, в Италии — Маттеуччи.

Одновременно с опытами Ома во Франции проводил свои опыты А. Беккерель, а в Англии — Барлоу. Опыты первого особенно замечательны введением дифференциального гальванометра с двойной обмоткой рамки и применением «нулевого» метода измерения. Опыты же Барлоу стоит упомянуть потому, что они экспериментально подтвердили постоянство силы тока во всей цепи. Этот вывод был проверен и распространен на внутренний ток батареи Фехнером в 1831 г., обобщен в 1851 г. Рудольфом Кольраушем (180Э—1858) на жидкие проводники, а затем еще раз подтвержден тщательными опытами Густава Нидмана (1826—1899).

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Беккерель применил дифференциальный гальванометр для сравнения электрических сопротивлений. На основе проведенных им исследований он сформулировал известный закон зависимости сопротивления проводника от его длины и сечения. Эти работы были продолжены Пуйе и описаны им в последующих изданиях его известных «Elements de physique experimentale» («Основы экспериментальной физики»), первое издание которых появилось в 1827 г. Сопротивления определялись методом сравнения.

Уже в 1825 г. Марианини показал, что в разветвляющихся цепях электрический ток распределяется по всем проводникам независимо от того, из какого материала они сделаны, вопреки утверждению Вольты, который полагал, что если одна ветвь цепи образуется металлическим проводником, а остальные — жидкими, то весь ток должен проходить по металлическому проводнику. Араго и Пуйе популяризировали во Франции наблюдения Марианини. Не зная еще закона Ома, Пуйе в 1837 г. воспользовался этими наблюдениями и законами Беккереля, чтобы показать, что проводимость цепи, эквивалентной двум разветвленным цепям, равна сумме проводимостей обеих цепей. Этой работой Пуйе положил начало изучению разветвленных цепей. Пуйе установил для них целый ряд терминов, которые живы и до сих пор, и некоторые частные законы, обобщенные Кирхгофом в 1845 г. в его известных «принципах»: в «узле» алгебраическая сумма сил токов равна нулю; в «петле» сумма произведений сопротивления каждого участка на соответствующую силу тока равна алгебраической сумме электродвижущих сил, действующих на участках этой петли.

Самый большой толчок для проведения электрических измерений, и в частности измерений сопротивления, был дан возросшими потребностями техники, и в первую очередь проблемами, возникшими с появлением электрического телеграфа. Впервые мысль об использовании электричества для передачи сигналов на расстояние родилась еще в XVIII веке. Вольта описал проект телеграфа, а Ампер еще в 1820 г. предлагал использовать электромагнитные явления для передачи сигналов. Идея Ампера была подхвачена многими учеными и техниками: в 1833 г. Гаусс и Вебер построили в Геттингене простейшую телеграфную линию, соединявшую астрономическую обсерваторию и физическую лабораторию. Но практическое применение телеграф получил благодаря американцу Самуэлу Морзе (1791—1872), которому в 1832 г. пришла удачная мысль создать телеграфный алфавит, состоящий всего из двух знаков. После многочисленных попыток Морзе в 1835 г. наконец удалось построить частным образом первую грубую модель телеграфа в Нью-Йоркском университете. В 1839 г. была проведена экспериментальная линия между Вашингтоном и Балтиморой, а в 1844 г. возникла организованная Морзе первая американская компания по коммерческой эксплуатации нового изобретения. Это было также первое практическое применение результатов научных изысканий в области электричества.

В Англии изучением и усовершенствованием телеграфа занялся Чарльз Уитстон (1802—1875), бывший мастер по изготовлению музыкальных инструментов. Понимая важность измерений сопротивления, Уитстон стал искать наиболее простые и точные методы таких измерений. Бывший в то время в ходу метод сравнения, как мы видели, давал ненадежные результаты, главным образом из-за отсутствия стабильных источников питания. Уже в 1840 г. Уитстон нашел способ измерения сопротивления независимо от постоянства электродвижущей силы и показал свое устройство Якоби. Однако статья, в которой это устройство описано и которую вполне можно назвать первой работой в области электротехники, появилась лишь в 1843 г. В этой статье дано описание знаменитого «мостика», названного затем в честь Уитстона. Фактически такое устройство было описано еще в 1833 г. Гюнтером Кристи и независимо от него в 1840 г. Марианини; оба они предлагали метод сведения к нулю, но их теоретические объяснения, при которых не учитывался закон Ома, оставляли желать лучшего.

Уитстон же был поклонником Ома и очень хорошо знал его закон, так что данная им теория «мостика Уитстона» ничем не отличается от приводимой сейчас в учебниках. Кроме того, Уитстон, чтобы можно было быстро и удобно изменять сопротивление одной стороны мостика для получения нулевой силы тока в гальванометре, включенном в диагональное плечо мостика, сконструировал три типа реостатов (само это слово было предложено им по аналогии с «реофором», введенным Ампером, в подражание которому Пекле ввел также термин «реометр»). Первый тип реостата с подвижной скобкой, применяемый и сейчас, был создан Уитстоном по аналогии со схожим приспособлением, применявшимся Якоби в 1841 г. Второй тип реостата имел вид деревянного цилиндра, вокруг которого была намотана часть подключенного в цепь провода, который легко перематывался с деревянного цилиндра на бронзовый. Третий тип реостата был похож на «магазин сопротивлений», который Эрнст Вернер Сименс (1816—1892), ученый и промышленник, в 1860 г. улучшил и широко распространил.

«Мостик Уитстона» дал возможность измерять электродвижущие силы и сопротивления.

Создание подводного телеграфа, пожалуй, еще более, нежели воздушного телеграфа, потребовало разработки методов электрических измерений. Опыты с подводным телеграфом начались еще в 1837 г., и одной из первых проблем, которую предстояло разрешить, было определение скорости распространения тока. Еще в 1834 г. Уитстон с помощью вращающихся зеркал, о чем мы уже упоминали в гл. 8, произвел первые измерения этой скорости, но полученные им результаты противоречили результатам Латимера Кларка, а последние в свою очередь не соответствовали более поздним исследованиям других ученых.

В 1855 г. Уильям Томсон (получивший впоследствии титул лорда Кельвина) объяснил причину всех этих расхождений. Согласно Томсону, скорость тока в проводнике не имеет определенной величины. Подобно тому как скорость распространения тепла в стержне зависит от материала, так и скорость тока в проводнике зависит от произведения его сопротивления на электрическую емкость. Следуя этой своей теории, которая в""его времена подверглась ожесточенной критике, Томсон занялся проблемами, связанными с подводным телеграфом.

Первый трансатлантический кабель, соединивший Англию и Америку, функционировал около месяца, но затем испортился. Томсон рассчитал новый кабель, провел многочисленные измерения сопротивления и емкости, придумал новые передающие аппараты, из коих следует упомянуть астатический отражательный гальванометр, замененный «сифонным регистратором» его же изобретения. Наконец, в 1866 г. новый трансатлантический кабель успешно вступил в действие. Созданию этого первого большого электротехнического сооружения сопутствовала разработка системы единиц электрических и магнитных измерений.

Основа электромагнитной метрики была заложена Карлом Фридрихом Гауссом (1777—1855) в его знаменитой статье «Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata» («Величина силы земного магнетизма в абсолютных мерах»), опубликованной в 1832 г. Гаусс заметил, что различные магнитные единицы измерения несоотносимы между собой, по крайней мере в большей своей части, и поэтому предложил систему абсолютных единиц, основанную на трех основных единицах механики: секунде (единице времени), миллиметре (единице длины) и миллиграмме (единице массы). Через них он выразил все остальные физические единицы и придумал ряд измерительных приборов, в частности магнетометр для измерения в абсолютных единицах земного магнетизма. Работу Гаусса продолжил Вебер, который построил много собственных приборов и приборов, задуманных еще Гауссом. Постепенно, особенно благодаря работам Максвелла, проводившимся в созданной Британской ассоциацией специальной комиссии по измерениям, которая издавала ежегодные отчеты с 1861 по 1867 г., возникла идея создать единые системы мер, в частности систему электромагнитных и электростатических мер.

Мысли о создании таких абсолютных систем единиц были подробно изложены в историческом отчете за 1873 г. второй комиссии Британской ассоциации. Созванный в Париже в 1881 г. Международный конгресс впервые установил международные единицы измерения, присвоив каждой из них название в честь какого-нибудь великого физика. Большая часть этих названий сохраняется до сих пор: вольт, ом, ампер, джоуль и т. д. После многих перипетий в 1935 г. была введена международная система Джорджи, или MKSQ, которая принимает за основные единицы метр, килограмм-массу, секунду и ом.

С «системами» единиц связаны «формулы размерностей», примененные впервые Фурье в его аналитической теории тепла (1822 г.) и распространенные Максвеллом, которым и установлены применяемые в них обозначения. Метрология прошлого века, основывавшаяся на стремлении объяснить все явления с помощью механических моделей, придавала большое значение формулам размерностей, в которых она хотела видеть не больше и не меньше как ключ к тайнам природы. При этом выдвигался ряд утверждений почти догматического характера. Так, чуть ли не обязательным догматом было требование, чтобы основных величин было непременно три. Но к концу века начали понимать, что формулы размерностей — это чистая условность, вследствие чего интерес к теориям размерностей стал постепенно падать.

Составила к.т.н. Савельева Ф.Н.