

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1954



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

7

СОДЕРЖАНИЕ

<i>О пуске в СССР первой промышленной электростанции на атомной энергии</i>	3
О. Б. Брон — Поле как вид материи	3
Л. Г. Мамиконянц — О переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными контурами на роторе	10
Е. Я. Казовский — Энергетические соотношения при внезапном коротком замыкании синхронной машины	16
Г. Н. Петров и А. И. Абрамов — Междувитковые напряжения в обмотках электрических машин при волновых процессах	24
Ю. А. Сабинин — Переходные процессы в системе синхронного вращения электроприводов механизмов гидротехнических сооружений	32
С. Я. Петров — Исследование дистанционных реле при двухфазных коротких замыканиях	38
Ф. А. Ступель — Вопросы проектирования поляризованных реле для электросилового автоматики	43
М. В. Грейсх — Выбор напряжения источника питания и способа выполнения сети высокого напряжения	47
М. М. Аходис, М. В. Бриль, В. М. Рудный и Х. П. Хирвонен — Исследование вентиляционной прочности испных вентилях в искусственной схеме	52
Н. П. Богородицкий, Н. Л. Полякова, Г. К. Кириллова и А. М. Эйделькинд — Новые виды электротехнической керамики	56
В. Г. Назаров — Электреты и их применение в электротехнике	60
А. М. Залесский и Н. И. Бачурин — Метод расчета изоляции конденсаторного типа	63
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Г. И. Лысаковский и К. М. Побегайло — Опыт включения высоковольтных вращающихся машин без сушки	68
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
К. М. Поливанов — Георг Симон Ом. К столетию со дня смерти.	70
О. Н. Веселовский — Роль О. М. Доливо-Добровольского в развитии теории переменного тока	77
ДИСКУССИИ	
Терминология теоретической электротехники — И. М. Постников, В. М. Лавров . К статье Л. И. Двоскина „Новая схема и конструкция распределительного устройства электростанции“ — Ю. К. Савицкий . К статье Д. С. Лившица „Защита цеховых сетей автоматами и предохранителями“ — М. Р. Найфельд, Г. К. Цвєрава .	81
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
К вопросу о выборе напряжения собственных нужд тепловых электрических станций	87
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Работы по передаче энергии постоянным током в Западной Европе. Маломощные газоразрядные преобразователи	88
ХРОНИКА	
Научная конференция Сибирского физико-технического института. Научно-техническая конференция в Илановском энергетическом институте им. Ленина. Вопросы электрификации сельского хозяйства на совещании в г. Баку. Научно-техническое совещание по вопросам керамической изоляции. В Свердловском отделении ВНИТОЭ. В Московском отделении ВНИТОЭ. В Академии наук Украинской ССР	89
БИБЛИОГРАФИЯ	
М. М. Соколов и А. А. Сиротин — Книга С. Н. Вешневского „Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей“	93
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	94
Номограмма для преобразования гиперболического и кругового тангенса и котангенса к показательной форме (стр. 95 и третья полоса обложки).	

Георг Симон Ом

К столетию со дня смерти

Выдающийся немецкий ученый Г. С. Ом родился 16 марта 1789 г. в Эрлангене в семье городского ремесленника [Л. 1]. Глубокое влечение к знанию и внимательное отношение к воспитанию своих детей характеризуют его отца — Иоганна Вольфганга Ома. В 40-летнем возрасте И. В. Ом, имея лишь начальное образование, занялся математикой и сам обучал своих сыновей Георга и Мартина; последний, так же как и его брат, стал известным ученым, профессором математики.

В 1805 г. Г. С. Ом поступил в Эрлангенский университет, но материальные затруднения заставили его уже в 1806 г. прервать свое обучение в университете и поступить на должность учителя в одном швейцарском воспитательном доме. В 1813 г. он вернулся в Эрланген, закончил университет и начал работать преподавателем математики в реальном училище в Бамберге.

Всю жизнь Г. С. Ом уделял большое внимание педагогической работе. Методике преподавания была посвящена и его первая печатная работа — «Основы целесообразного рассмотрения геометрии как средства для высшего образования». После ее опубликования Г. С. Ом получил предложение занять должность старшего преподавателя математики в Кельнской гимназии (1817—1826). Интересно отметить, что здесь среди его учеников был в будущем знаменитый математик Дирихле.

В эти годы Г. С. Ом заинтересовался физикой. В 1820 г. он начал заниматься исследованиями гальванической цепи; его работы опубликованы в ряде журнальных статей [Л. 2] и в отдельной монографии «Гальваническая цепь в математическом описании» [Л. 3]. Для завершения названной монографии Г. С. Ом в 1825 г. взял годичный отпуск и перескал в Берлин (1826—1833). С 1833 г. Г. С. Ом — профессор физики в Нюрнбергской политехнической школе (1833—1849); с 1839 г. он был назначен ее ректором.

Последние годы жизни Г. С. Ома протекали в Мюнхене (1849—1854), где он занимал должность хранителя коллекций Баварской академии. Одновременно (с 1849 г.) Г. С. Ом являлся экстраординарным профессором Мюнхенского университета; в 1852 г. он получил должность ординарного профессора в том же университете.

Помимо исследований в области электриче-



ской цепи, связанных с установлением известного закона Ома, ему принадлежат серьезные работы и в других областях физики. Так, он установил, что восприятие слухом того или иного тона возможно только при наличии гармонического колебания соответствующей частоты в сложном спектре звука (акустический закон Ома).

Эти работы были широко известны и освещались в монографиях XIX в., например в известной книге Ф. Ф. Петрушевского [Л. 4], в монографиях Гельмгольца и Рэлея и в статье Дюамеля [Л. 5]. Одна из неоконченных работ Ома была

посвящена системе молекулярной физики, над которой он работал в Нюрнберге. В последние годы жизни Г. С. Ом занимался исследованием интерференции в кристаллических пластинах.

Но, конечно, несравнимое с другими значение имеют работы Г. С. Ома по исследованию электрической цепи, принесшие ему, правда далеко не сразу, всемирную известность. Г. С. Ом сознательно стремился к тому, чтобы вывести многочисленные явления, происходящие в гальванических цепях, из небольшого числа принципов, большей частью полученных из опыта, руководствуясь при этом лучшими достижениями своих современников и предшественников; среди них Г. С. Ом особенно ценил выдающееся исследование Ж. Фурье [Л. 6], оказавшее на него сильное влияние.

Стремление Г. С. Ома к созданию обобщающей теории и трудности его жизненного пути отражены в кратком, но характерном предисловии к его «Гальванической цепи».

«Я публикую теорию гальванического электричества, как один из разделов общего учения об электричестве, и предполагаю в дальнейшем, — поскольку мне это позволят время, воля и условия, — последовательно присоединять новые части, образующие единое целое, если только ценность первых полученных результатов в какой-то мере оправдает те жертвы, которых они мне стоили.

Условия, в которых я до сих пор жил, не были подходящими ни для того, чтобы вновь зажечь во мне отвагу, которую грозил уничтожить холод жизни, ни для того, чтобы ознакомиться во всей полноте, — что, однако, необходимо, — с литературой, относящейся к близким вопросам; поэтому для пробного выступления я выбрал ту часть, в которой я меньше должен был считаться с кон-

курением. Хотелось бы, чтобы благожелательный читатель принял мою работу с той же любовью к предмету исследования, которая привела к его созданию!».

Уже давно выдающиеся исследования Г. С. Ома получили всеобщее признание. Но как их встретили его современники, были ли они встречены с той любовью к предмету научного исследования, о которой мечтал Ом? Был ли он вознагражден при жизни за понесенные жертвы и годы лишений?

Одним из первых откликнулся, высокомерно отпосившийся к экспериментальной науке, бреславльский профессор Г. Ф. Поль, который в известном берлинском журнале писал [Л. 7]:

«Тот, кто благоговейными глазами взирает на вселенную, должен отвернуться от этой книги, являющейся плодом неисправимых заблуждений и преследующей единственную цель умалить величие природы».

Содержание работы Г. С. Ома он называет «сплетением голых фантазий», сожалея о том, что «большинство современных гальванистов кажется удовлетворены тем лабиринтом, в который они сами себя заключили».

Не более лестные отзывы о книге Ома дал и другой физик — Кемц.

Неудивительно поэтому, что Г. С. Ом писал [Л. 8] к дружески расположенному к нему И. С. Швейгеру¹: «Моя «Гальваническая цепь» причинила мне ужасные огорчения и я был готов проклясть час ее зарождения».

Добавим, что Г. С. Ом рассчитывал на изменение своего тяжелого материального положения после опубликования своих фундаментальных исследований. Однако единственно, что ему было предложено, — это преподавание в Берлинской военной школе; при этом он должен был или поступиться необходимым ему свободным временем, или ограничиться самым скудным заработком; Г. С. Ом предпочел последнее.

Г. С. Ома ожидали и другие огорчения. Он разослал свою книгу в ряд крупнейших научных учреждений, в том числе и во Французскую академию наук, ее действительному члену Ж. Фурье, работы которого оказали большое влияние на Г. С. Ома. Излагая существо своих идей, Г. С. Ом в 1822 г. писал²: «Я исходил из предположения, что передача электричества от какой-либо частицы переходит прямо только к одной соседней с нею частице, так что не происходит непосредственной передачи от такой частицы к какой-либо другой, расположенной на более значительном расстоянии. Величину потока между двумя смежными частицами при всех равных прочих обстоятельствах я считал пропорциональной разности электрических сил между обеими частица-

ми; точно так и в теории теплоты тепловой поток между двумя частицами рассматривается, как пропорциональный разности их температур».

Однако Ж. Фурье, столь ценимый Омом, получив его книгу, ответил только, что Дюлонг и Ампер доложат о его работе.

Казалось бы, идея Ома о математическом описании распределения плотности тока в проводнике и самый закон Ома

$$\delta = \sigma E \quad (1,1)$$

должны были быть особенно понятны именно Фурье из полной аналогии с распределением теплового потока. Наши современники ведь часто говорят о тепловом законе Ома. Возможно, что причиной тому служила и некоторая трудность изложения, и немецкий язык, и кажущаяся чуждость для Фурье вопросов теории электричества.

В первые 6 лет после опубликования Омом «Гальванической цепи» его работы признавались немногими учеными, в том числе Поггендорфом, Пфаффом и Фехнером [Л. 10]; последний прямо писал Швейгеру, что он полностью разделяет его отношение к работам Ома, пролившим свет на законы явлений в электрической цепи.

В то же время ряд ученых выступал с прямым опровержением закономерностей, установленных Омом. Кстати, это уже и не так удивительно. В самом деле, экспериментальные средства в то время были очень несовершенны; к тому же легко представить условия, в которых влияние измерительных приборов приводит к кающемуся нарушению закона Ома; неучитываемый различный нагрев проволок, имеющих разное сопротивление или включаемых к разным источникам, также мог оказывать заметное влияние; наконец, изменение внутреннего сопротивления источников и явление поляризации могли сильно исказить картину; добавим, что существуют и пелипейные элементы цепи, действительно не подчиняющиеся закону Ома.

Важно отметить и то обстоятельство, что на основании своих первых опытов и сам Г. С. Ом пришел к неверной формулировке [Л. 2, XLIV (1825)] зависимости между напряжением v на проволоке (потерей электроскопической силы) и длиной x этой проволоки, замыкающей одну и ту же цепь:

$$v = m \lg \left(1 + \frac{x}{a} \right), \quad (1,2)$$

где m и a — постоянные.

Недостаточное знакомство со всеми работами Ома привело и к другому недоразумению. Французский физик К. С. Пуье [Л. 11], ознакомившись лишь с кратким и неполным рефератом работ Ома, решил самостоятельно проверить справедливость выраженных Омом аналитических зависимостей. Однако подтвердив все результаты Ома, Пуье считал их новыми, т. е. полученными впервые им самим; он не знал, повидимому, о полноте проведенных и опубликованных

¹ И. С. Швейгер (1779—1857) — известный физик, изобретатель первого гальванометра [Л. 21], издатель одного из научных журналов, в котором публиковались исследования Ома.

² Цитировано по Уиттекеру [Л. 9].

Г. С. Омом исследований. Работы Пуйе, несмотря на неправильное освещение роли самого Г. С. Ома, имели большое значение для признания и распространения теории гальванической цепи.

Первоначально (1828 г.) положительно отзывался о работах Г. С. Ома знаменитый шведский ученый И. Я. Берцелиус³. Он писал [Л. 12]: «Хотя некоторые из результатов Ома и окажутся может быть впоследствии не вполне удовлетворительными, тем не менее попытка построить и здесь наши знания на такой же твердой почве, на какой стоят законы тяжести и движений, является большой заслугой».

Однако в следующей публикации [Л. 13] Берцелиус высказал (1832 г.) ряд отрицательных суждений, глубоко задевших Г. С. Ома, о чем мы знаем по удивительно проникновенному и нежному письму И. С. Швейгера к Г. С. Ому⁴: «...Кажется, он (Берцелиус) даже не считает себя физиком, да по моему у него нет и физического чутья, так что слишком много чести для него в подробном ответе на заметку, вообще не заслуживающую обсуждения... Не волнуйся, со временем ты встретишь более спокойные условия, которых я искренне тебе желаю. Ты совершенно не должен обращать внимания на подобные вещи...».

Отрицание результатов, найденных Г. С. Омом, продолжалось еще долго. Так, крупный французский ученый С. М. Дебре еще в 1852 г. [Л. 14] утверждал, что «закон Ома никак не представляет собой точного выражения фактов».

Однако ясность физических понятий, строго определенных Г. С. Омом, простота установленных им закономерностей и тщательность проведенных опытов не могли, конечно, со временем не получить всеобщего признания. Для характеристики научного значения работ Г. С. Ома интересно привести слова американского физика Генри⁵: «Когда я в первый раз прочел теорию Ома, то она мне показалась молнией, вдруг осветившей комнату, погруженную во мрак».

Большое влияние на общее признание закона Ома имели работы русских ученых Э. Х. Ленца и Б. С. Якоби [Л. 15—17].

В 1833—1835 гг. были опубликованы исследования Э. Х. Ленца, посвященные изучению электрической проводимости металлов при разных температурах (1833 г.) и закону зависимости электрической проводимости проволок от их длины и диаметра (1835 г.). В последней работе Э. Х. Ленц, полемизируя с английским физиком Ритчи (Ritchie), упрекает его в полном незнании работ Ома и Фехнера, тем самым показывая свое собственное положительное отношение к ним.

В 1835 г. Б. С. Якоби в работе о применении электромагнетизма для приведения в движение

машин [Л. 16], говоря о простоте и хорошем согласовании с опытом теории Ома, обнаруживает глубокое знание его работ.

В 1838 г. Э. Х. Ленц в совместной работе с Б. С. Якоби о законах электромагнитов [Л. 17, Избранные труды, стр. 271] безоговорочно утверждает, что «Основой для расчета элементов гальванической цепи является закон Ома, получивший строгое и многократное подтверждение в прекрасных работах других физиков; он, как известно, выражается формулой

$$F = \frac{A}{L + l}, \quad (1,3)$$

где F — ток; A — сумма действующих в цепи электродвижущих сил; L — полное сопротивление самой цепи, а l — сопротивление включенного в нее проводника».

Важным актом, завершившим и окончательно утвердившим признание работ Г. С. Ома, было присуждение ему медали Коплея (Copley) Лондонским королевским обществом (Английской академией наук). Присуждение медали⁶ состоялось в конце 1841 г. за исследование законов электрического тока, опубликованных в ряде статей и в отдельной книге. В публикации, сопровождавшей присуждение медали, говорится, что Г. С. Ом отказался от многих обычных для того времени неопределенных и лишних понятий, которыми пользовались при описании гальванических явлений, показав «что все следствия из этих представлений являются совершенно ошибочными».

«Он показал и теоретически и экспериментально, что действие цепи (the action of a circuit) равно сумме всех электродвижущих сил, деленной на сумму всех сопротивлений» независимо от того, чем возбуждаются э. д. с.

Далее говорится о большом значении исследований Г. С. Ома и отмечается, что «работы Ома в течение более чем 10 лет оставались непризнанными (единственно Фехнер принял и подтвердил взгляды Ома), но за последние пять лет Гаусс, Ленц, Якоби, Поггендорф, Генри и многие другие знаменитые ученые признали большое значение его исследований».

В том же году появился английский перевод [Л. 18] книги Г. С. Ома⁷.

Следует отметить, что работы Г. С. Ома сохранили определенное направление и метод исследований, важнейшую идею строгого матема-

⁶ Значение, какое имело присуждение Коплеевской медали, легко понять, если учесть, что в 1837 г. эта медаль была присуждена Берцелиусу, а в 1839 г. — Гауссу. Сам Г. С. Ом со свойственной ему скромностью писал: «Я чувствую, что такое отличие является слишком большим за работу, которая в то время (1827) была выполнена только в общих чертах» [Уинтер, Л. 8].

⁷ Перевод был выполнен студентом Берлинского университета Вильямом Фрэнсисом, которому помогал Чарльз Уитстед, действительный член Лондонского королевского общества, посвятивший Г. С. Ому в 1843 г. публичную лекцию на Бекерианских чтениях и опубликовавший статью, посвященную работам Г. С. Ома. Французский перевод той же книги появился в 1860 г.

³ Шведский химик и минералог, непреходящий секретарь Стокгольмской академии наук. С 1820 г. — иностранный почетный член Петербургской академии наук.

⁴ Цитировано по Уинтеру [Л. 8].

⁵ Цитировано по Ф. Ф. Петрушевскому [Л. 4].

тического описания электрической цепи, основанного на точном эксперименте при пользовании ясными определениями величин, характеризующих электрическую цепь, и, наконец, точную формулировку основного закона электрической цепи. Перечисленного оказалось достаточно для дальнейшего успешного развития теории электрической цепи именно по пути, выбранному и указанному Г. С. Омом.

Ом умер 6 июля 1854 г. в возрасте 65 лет. Научные заслуги Г. С. Ома получили всеобщее признание. Основной закон электрической цепи, впервые сформулированный Г. С. Омом, получил наименование закона Ома. В 1881 г. имя Ома было присвоено практической единице электрического сопротивления [Л. 19]. Его жизни и деятельности посвящено много работ как русских, так и иностранных.

Ниже остановимся несколько подробнее на содержании открытого Омом закона и примененных им впервые уравнениях для цепи с распределенными постоянными.

Закон Ома. Это первый закон электрической цепи, с которым знакомятся все начинающие изучать электротехнику. Закон этот чрезвычайно прост. Однако строгая формулировка этого закона существенно отличается от простого выражения

$$I = U/R, \quad (2.1)$$

часто именуемого в обиходе законом Ома.

В самом деле, прежде всего нужно заметить, что выражение (2.1) можно применять только к пассивному участку цепи (не содержащему источников э. д. с.). Во-вторых, в общем случае это выражение применимо только к цепи с установленными постоянными значениями тока и напряжения. В-третьих, выражение (2.1) скорее можно рассматривать как уравнение, определяющее понятие сопротивления

$$R = U/I, \quad (2.2)$$

применим к тому же как для цепей, подчиняющихся закону Ома, так и для цепей нелинейных, в которых само сопротивление зависит от величины тока или напряжения.

Выражение (2.1) становится похожим на закон Ома только после следующей важнейшей оговорки: при прочих равных физических условиях («unter übrigen gleichen Umständen» [Л. 3, стр. 3])

$$R = \text{const}, \quad (2.3)$$

т. е. ток в участке пассивной цепи прямо пропорционален разности потенциалов (U) на концах этого участка.

Однако содержание сформулированного Омом закона глубже и выражение (2.1) вместе с условием (2.3) могут быть получены как следствие более общей формулировки закона Ома, которую в настоящее время можно выразить так: плотность тока при прочих равных условиях прямо пропорциональна напряженности поля:

$$\delta = \sigma E, \quad (2.4)$$

причем коэффициент пропорциональности σ характеризует электропроводность данного вещества, данной среды.

Зная, что плотность тока, умноженная на площадь поперечного сечения проводника S , равна току I , приходим к равенству

$$I = \sigma SE. \quad (2.5)$$

Последнее отличается от оригинальной формулировки Ома; сн, не пользуясь понятием напряженности поля E , выражал ее как производную от потенциала («электроскопической силы»):

$$E_x = -\frac{du}{dx}, \text{ или } E_n = -\frac{du}{dn}. \quad (2.6)$$

В обозначениях Ома равенство (2.5) выглядит так [Л. 3, стр. 12]:

$$S = \kappa \omega \frac{du}{dx}, \quad (2.7)$$

где S — ток (I); κ — удельная электрическая проводимость (σ); ω — поперечное сечение проводника (S); u — потенциал (φ) или — по терминологии Ома — электроскопическая сила; x — перемещение вдоль оси проводника.

Для согласования знака тоска и знака производной следует отсчитывать x в направлении, противоположном положительному направлению тоска (см. рис. 2), о чем в «Гальванической цепи» нет достаточно четких указаний.

Для проволоки с постоянными сечением и проводимостью, имеющей длину l , из (2.7) находим:

$$S = \kappa \omega \frac{u' - u}{l}, \quad (2.8)$$

где $u' - u$ — разность потенциалов (электроскопических сил), или — по нашей современной терминологии — напряжение U .

Перепиывая (2.8) в современных обозначениях, получаем:

$$I = \sigma S \frac{U}{l}. \quad (2.9)$$

Сопоставляя последнее равенство с выражением (2.1), мы видим, что закон Ома содержит не только утверждение пропорциональности между током и напряжением (при неизменности других физических условий), но также определение коэффициента пропорциональности или сопротивления. Как видно из сопоставления (2.1) и (2.9), для однородной проволоки постоянного сечения сопротивление

$$R = \frac{l}{\sigma S}. \quad (2.10)$$

Эту величину Г. С. Ом назвал приведенной длиной проволоки:

$$L = \frac{l}{\kappa \omega}. \quad (2.11)$$

Г. С. Ом сформулировал свой закон после тщательного проведения опытов, особенностью которых являлось наличие яркой руководящей идеи. В самом начале своей «Гальванической цепи» (стр. 3) Г. С. Ом писал: «Я предполагал, что переход электричества между двумя ближайшими элементами при прочих равных условиях пропорционален разности электрических сил в этих элементах, подобно тому, как в учении о теплоте принято, что переход тепла между двумя элементами тока пропорционален разности их температур».

Такое предположение являлось в известной мере естественным следствием известного Ому закона Дэви [Л. 22], а также его собственных опытов.

Г. С. Ом сочетал глубокое знание математических работ, в первую очередь работ Фурье и Пуассона (об этих работах Г. С. Ом говорит в начале своей «Гальванической цепи» — стр. 5), с глубоким знанием работ в области физики гальванических явлений. Г. С. Ом был тонким и глубоким экспериментатором. Именно это сочетание позволило Г. С. Ому открыть основной закон гальванической цепи. Понять значение этого открытия сейчас очень просто. Значительно сложнее понять те трудности, которые должен был преодолеть в свое время Г. С. Ом. Может даже показаться, что наличие отчетливой формулировки закона Фурье (можно сказать «теплого закона Ома»)

$$Q = l \frac{F(t' - t)}{D}, \quad (2.12)$$

где Q — количество тепла, проходящее в единицу времени через призматическое тело; l — теплопроводность; F и D — сечение и длина призмы; $t' - t$ — разность температур на основаниях призмы — позволяло сразу, по аналогии, написать выражение для электрического закона Ома (2.8). Однако это совсем не так. Действительно, установление электро-

сконической силы (потенциала) как величины, аналогичной температуре, не говоря уже об экспериментальных трудностях ее измерения, является важной и долго оспаривавшейся заслугой Ома. Добавим, что понятие тока в то время только-только начало устанавливаться, и утверждение того, что „магнитное действие цепи“ может служить во всех случаях мерой тока, было достаточно новым. Правда, после знаменитого открытия Эрстеда очень быстро появились измерительные приборы, приближавшиеся к современному гальванометрам. Ими можно было измерять ток по его магнитному действию. Изобретателем первого такого прибора — „мультипликатора“ — был И. С. Швейгер, близкий друг Г. С. Ома. Для усиления действия слабых токов на магнитную иглу Швейгер уже в 1820 г. применил многвитковую обмотку [Л. 20]. Этот прибор был вскоре усовершенствован Поггендорфом [Л. 21].

Большое значение для открытия Г. С. Ома имели работы его предшественников и прежде всего выдающегося английского ученого Х. Дэви [Л. 22]. Вскоре после изобретения А. Вольты (1800 г.) эксперименты с вольтаическим столбом показали, что его действие зависит не только от числа пластин и их размеров, но и от внешней части цепи.

Первым отчетливо указавшим на это обстоятельство был наш знаменитый соотечественник В. В. Петров. Он еще в 1802 г. прямо указывал, что действие, производимое „вольтаическим столбом“, уменьшается с длиной замыкающей его проволоки и увеличивается с увеличением его сечения [Л. 23]. Это отмечалось как в СССР [Л. 24], так и за границей [Л. 25]. В. В. Петров, правда, еще не мог дать количественной оценки влияния внешней цепи; в употреблявшемся им слово „сопротивление“, можно полагать, еще не вкладывалось смысла физической величины.

Более определенные результаты исследований Х. Дэви 1821 г. показали, что проводимость прямо пропорциональна сечению проводника и обратно пропорциональна его длине. О проводимости Дэви судил, сравнивая выделение газов при электролизе в цепи, замыкаемой различными проводниками. Значение исследований Дэви важно прежде всего потому, что они опровергли существовавшее в то время мнение о зависимости проводимости не от сечения, а от поверхности проводника (такая точка зрения, конечно, объясняется представлениями, заимствованными из электростатики).

Исследования Х. Дэви подтвердили точку зрения его предшественников Квендиша и Петрова о роли сечения и длины; Ф. Дэви правильно установил и сравнительную проводимость различных металлов, расположив их в ряд: серебро, медь, свинец, золото, цинк, олово, платина, палладий, железо.

Интересно отметить, что в то время правильное определение этого ряда также было большим научным достижением, между прочим и потому, что оно было противопоставлено ложному представлению, поддерживавшемуся многими учеными, о том, что наибольшей проводимостью обладали наиболее пассивные металлы; этот ряд начинался с золота и правильно продолжался серебром и медью.

Говоря об исследованиях Х. Дэви, можно только удивляться точности полученных им результатов при достаточной неопределенности критериев одинаковой проводимости, при отсутствии методов измерения тока⁸ и, даже больше, при отсутствии определения того, что такое величина (или сила) тока, а уже тем более, что такое проводимость.

В самом деле, определение проводимости и обратной ей величины, т. е. сопротивления, из отношения тока к напряжению

$$G = 1/R = I/U \quad (2,13)$$

по существу также связано с исследованиями Ома. Именно поэтому уравнения (2,1) и (2,2), в конце концов служащие лишь определенным понятием сопротивления и проводимости (если не отмечать их независимость от тока и напряжения), часто и называются законом Г. С. Ома.

⁸ Первые измерения тока по его магнитному действию принадлежат Швейгеру и Поггендорфу, а первая попытка установления определенной единицы для тока была сделана только Пуье при его работах по проверке закона Ома.

Результаты исследований Х. Дэви и согласующуюся с ними идею о применимости уравнений Фурье к гальванической цепи можно назвать основами исследований Г. С. Ома. Однако, для того чтобы от них прийти к основному закону гальванической цепи, Г. С. Ому надо было провести тщательные экспериментальные исследования и прежде всего правильно выбрать подлежащие измерению основные величины. Но и после того как Ом выбрал магнитное действие тока и электроскопическую силу (т. е. потенциал цепи, определяемый посредством электроскопа), перед ним лежали большие экспериментальные трудности, из которых главной (не говоря о трудностях электроскопических измерений малых напряжений) являлось непостоянство э. д. с. и непостоянство внутреннего сопротивления гальванических элементов.

К устойчиво получавшимся однозначным результатам Г. С. Ом пришел лишь после того, как он начал работать с термо-электрическими источниками э. д. с., по совету Поггендорфа, передавшему Г. С. Ому его братом (профессором-математиком Марином Омом). Основные эксперименты Г. С. Ом провел с висмута-медной термопарой, у холодного и горячего спаев которой поддерживались постоянные температуры (0 и 100° С). Экспериментальные исследования Г. С. Ома были описаны им в ряде работ, однако в своей „Гальванической цепи“ он излагает полученные им бесспорные результаты без непосредственных указаний на произведенные им опыты⁹.

Излагая свою теорию, Г. С. Ом строил потенциальную диаграмму неразветвленной цепи. Одна из таких диаграмм показана на рис. 1 (воспроизводящем фиг. 3 из оригинальной работы Г. С. Ома).

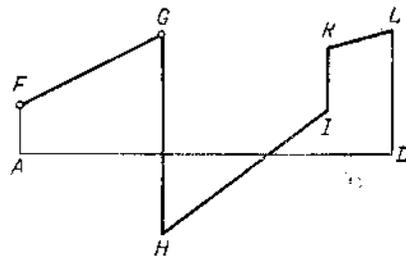


Рис. 1. Потенциальная диаграмма неразветвленной цепи, состоящей из трех отрезков проволоки с различной проводимостью на единицу длины при наличии э. д. с. в местах их соединения (рис. 3 „Гальванической цепи“ Г. С. Ома [Л. 3]).

Отрезок AD (горизонтальная ось) представляет собой развертку замкнутой проволоочной цепи. Ординаты, отсчитываемые от линии AD, показывают потенциал и соответствующих точек цепи — по терминологии Г. С. Ома их электроскопическую силу или силу (интенсивность) положительного электричества [«die Stärke der positiven Elektrizitäten», Л. 2, стр. 12]. Наклон линий (du/dx) определяет падение потенциала на единицу длины проволоки (die Gefälle).

При одинаковом сечении (ω) проволок это падение обратно пропорционально удельной проводимости (κ) материала (die Leitungvermögen); при одинаковом материале падение обратно пропорционально сечению. В неразветвленной цепи (в установившемся режиме $du/dt = 0$ и при отсутствии утечек тока в окружающую среду) ток (S) в цепи остается постоянным и, следовательно,

$$S = \kappa \omega \frac{du}{dx} = \kappa' \omega' \frac{du'}{dx'} \quad (2,14)$$

В последнем уравнении нетрудно заметить предвосхищение первого закона Кирхгофа.

К этим предельно простым и точным утверждениям Г. С. Ом добавляет следующее: в местах образования гальванических пар возникают напряжения (мы теперь говорим э. д. с.); эти напряжения на рис. 1 изображаются отрезками GH, KI и разностью отрезков DL — AF.

⁹ Это и служило причиной отмеченного нами в начале заблуждения Пуье.

Из уравнений (2,14) или из рассмотрения потенциальной диаграммы, изображенной на рис. 1 (а также из двух других приводимых Г. С. Омом аналогичных, но более простых диаграмм), непосредственно следует, что разность потенциалов на каждом из участков цепи равна произведению тока и „приведенной длины“ этого участка:

$$L = \frac{l}{\kappa\omega}; L' = \frac{l'}{\kappa'\omega'} \quad (2,15)$$

„Приведенная длина“ Ома есть не что иное, как электрическое сопротивление. Из тех же потенциальных диаграмм очевидно, что сумма разностей потенциалов на отдельных участках цепи равна сумме всех электродвижущих сил (напряжений), действующих в рассматриваемой замкнутой цепи. Это и позволило Г. С. Ому так сформулировать свой закон:

$$I = S = \frac{A}{L} \quad (2,15)$$

где A — сумма всех напряжений (всех э. д. с.), а L — сумма приведенных длин всех участков цепи.

В этой формулировке, определяемой Э. Х. Ленцем как закон Ома [см. выше уравнение (1,3)], нетрудно увидеть предвосхищение второго закона Кирхгофа.

Замечательной является еще одна формула, проводимая Омом для определения тока (S) в цепи при m последовательно включенных источниках:

$$S = \frac{mA}{mL + \lambda} \quad (2,16)$$

здесь A и L — э. д. с. и внутреннее сопротивление каждого из источников, а λ — приведенная длина (т. е. сопротивление) проводов, замыкающих цепь.

После всего проведенного Г. С. Омом анализа эта последняя формула элементарно ясна; вместе с тем она со всей логической ясностью объясняет казавшуюся очень сложной зависимость тока в цепи от числа последовательно включенных источников (заметим еще, что и A , и L , и λ в различных экспериментах были различными).

В заключение еще раз подчеркнем, сколько новых и важных понятий пришлось ввести или во всяком случае уточнить Г. С. Ому при анализе гальванической цепи: сопротивление, потенциал, напряженность поля или производная от потенциала, непрерывность тока, э. д. с.

Заметим, что независимость сопротивления в электрической цепи от величины тока, т. е. постоянство отношения тока к напряжению (при прочих равных условиях), является настолько характерной чертой установленного Г. С. Омом закона, что мы теперь говорим о законе Ома и для линейной цепи переменного тока, например:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2,17)$$

Часто по аналогии с электрической цепью говорят о законе Ома и для других явлений, описываемых аналогичными равенствами: упоминавшийся тепловой закон Ома, магнитный закон Ома.

Ом как единица сопротивления употребляется и в других областях физики; так, в акустике иногда говорят об акустическом оме, в механике — о механическом оме [Л. 26].

Уравнения Ома для цепи с распределенными постоянными. В своем исследовании электрической цепи Г. С. Ом рассмотрел также впервые цепь с распределенными постоянными (в квазистатических условиях $du/dt = 0$), применив, конечно тоже впервые, дифференциальные уравнения к расчету электрической цепи. И в этой части работы сказалося правильное понимание Омом значения замечательных исследований Фурье.

Цепь, рассматривавшаяся Омом, представляла собой проволочное кольцо с источником, создававшим постоянное напряжение a (рис. 2).

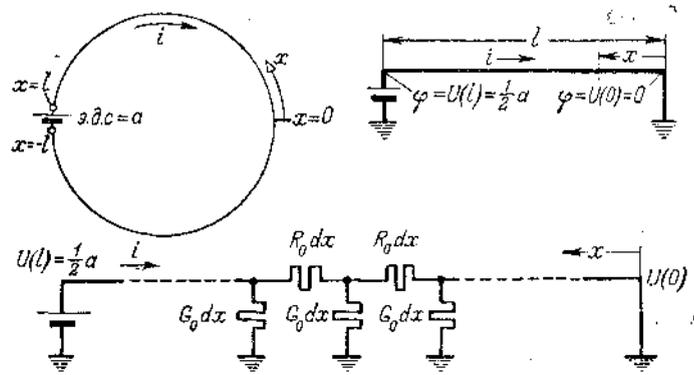


Рис. 2. Пояснения к уравнению Г. С. Ома для цепи с распределенными постоянными.

Слева изображено проволочное кольцо длиной $2l$ с источником, э. д. с. которого a . Справа — половина того же кольца в развернутом виде. Внизу — схема, поясняющая распределенность продольного сопротивления (R_0) и поперечной проводимости (G_0).

$U(l)$ — потенциал (электростатическая сила) в начале линии (у положительного полюса источника напряжения); $U(0) = 0$ — то же в конце линии (в точке проволочного кольца, диаметрально противоположной источнику).

Предположение о таком распределении потенциалов оправдывается условиями симметрии.

Сопротивление на единицу длины проволоки предполагалось постоянным:

$$R_0 = \frac{1}{\kappa S} = \frac{1}{\kappa\omega} \quad (3,1)$$

(κ и ω — обозначения для удельной электрической проводимости и сечения проволоки, применявшиеся Г. С. Омом). При этом ток вдоль проволоки Г. С. Ом принимал постепенно убывающим за счет его утечки (как мы сказали бы сейчас) через поперечную проводимость (опять же говоря современным языком). Поперечную проводимость на единицу длины Г. С. Ом обозначал произведением двух постоянных:

$$G_0 = bc \quad (3,2)$$

На рис. 2 показана схема цепи, рассматривавшейся Г. С. Омом (в монографии Ома поясняющих рисунков не содержится).

Зная, что „падение электростатической силы“ — продольная слагающая напряженности поля на единицу длины — выражается равенством

$$\frac{du}{dx} = R_0 i = \frac{1}{\kappa\omega} S \quad (3,3)$$

и что изменение тока вдоль линии характеризуется равенством

$$\frac{di}{dx} = G_0 u = bc u \quad (3,4)$$

Г. С. Ом приходит к уравнению

$$\kappa \frac{a^2 u}{dx^2} - \frac{bc}{\omega} u = 0 \quad (3,5)$$

Деля уравнение Ома (3,5) на удельную проводимость проволоки κ и пользуясь обозначениями уравнений (3,1) и (3,2), приведем это уравнение к общепринятой в наше время форме:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - G_0 R_0 u = 0 \quad (3,6)$$

При граничных условиях, показанных на рис. 2:

$$u_{x=0} = U(0) = 0 \text{ и } x = \pm l = U(\pm l) = \pm \frac{1}{2} a \quad (3,7)$$

решение (3,5) или (3,6) Ом представляет равенством [Л. 3, стр. 168]

$$u = \frac{1}{2} \alpha \frac{e^{\beta x} - e^{-\beta x}}{e^{\beta l} - e^{-\beta l}}, \quad (3,8)$$

где

$$\beta^2 = \frac{bc}{\kappa m} = G_0 R_0. \quad (3,9)$$

Интересно обратить внимание на то, что обозначение „постоянной затухания“ посредством буквы β сохранилось и в современной литературе.

Переходя к гиперболическим функциям, можно придать (3,8) ту форму, в которой это уравнение можно встретить в современных работах:

$$u = u(l) \frac{\text{sh } \beta x}{\text{sh } \beta l} \quad (3,10)$$

Формулируя изложенный здесь вывод, Г. С. Ом высказывал и ряд ошибочных предположений; так, постоянная c в равенстве (3,2) им толковалась как периметр провода; он считал, что при неустановившемся режиме, когда $du/dt \neq 0$, происходит накопление электричества, пропорциональное объему тела (подобно накоплению тепла); такое предположение, конечно, неприменимо к металлическим проводникам, хотя оно и может быть применено к условиям газового разряда. Однако это не умаляет глубокой ценности проведенного им анализа и глубокой важности первого применения дифференциальных уравнений к теории электрических цепей.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность доктору техн. наук, проф. Л. Д. Белькинду, заведующему Кафедрой истории техники Московского энергетического института им. Молотова, за оказанную помощь и ценные указания при подготовке данной статьи.

Литература

1. C. Matschoss. *Männer der Technik*. Berlin, стр. 194—195, 1925
C. M. v. Baucrnfeind. *Gedächtnisrede auf G. S. Ohm*. München, 1882.
2. Schweiggers *Journal*, XLIV, 245, 1825; XLVI, 137, 1826; LV, 1829; LVIII, 1830;
Poggendorffs *Ann.* 4, стр. 79, 97, 1825; 6, стр. 459, 1826; 7, стр. 45 и 117, 1826.
3. Dr. G. S. Ohm. *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*. Berlin, verlag T. H. Riemann, 1827.
4. Ф. Ф. Петрушевский. *Наблюдательная физика*, т. I, стр. 353, т. II, стр. 345, 1874.
5. H. Helmholtz. *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Berlin, 1863; Релей. *Теория звука*, I, § 27. Duhamel, C. R., XXVII, стр. 455, 1848.
6. J. Fourier. *Theorie analytique de la chaleur*, Paris, 1822.

7. O. F. Pohl. *Berliner Jahrbüchern für wissenschaftliche Kritik*, № 11—14, 1828. Цитаты по статье Уинтера [Л. 8].

8. H. J. Winter. *On the Reception of Ohm's. Electrical Researches by His Contemporaries*. *Phil. Mag.*, т. 35, № 245, 371, 1944. *Обстоятельная библиография с указанием архивных материалов.*

9. E. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. London, 1951 (гл. 3, стр. 90—93; от Гальвани до Ома).

10. G. T. Fechner. *Maasbestimmung über die galvanische Kette*. Leipzig, 1831; *Repertorium der Physik*, I, стр. 392—449.

11. C. S. Pouillet, C. R., т. 4, 267, 1837, т. 20, 199, 1845; *Pogg. Ann.*, т. 42, 281.

12. J. Berzelius. *Jahresbericht über die Fortschritte der Physik und Chemie*, т. 7, 15, 1828;

13. *Jahresbericht über die Fortschritte der Physikalischen Wissenschaften, aus dem Schwedischen übersetzt von F. Wöhler*, год 11, стр. 21, 1832.

14. C. M. Despretz. C. R., т. 34, 781, 1852.

15. Э. Х. Ленц. Об электрической проводимости металлов при разных температурах. *Mem. de la Classe Phys.-Math. de l'Acad. des Sciences*. Clб., VI сер., т. 2, стр. 632, 1833; О законе электрической проводимости проволоки различных диаметров и длин, там же, VI сер., т. 3, стр. 188, 1835.

16. Б. С. Якоби. О применении электромагнетизма к движению машин. Сборник „Электродвигатель в его историческом развитии“, стр. 148—209, изд. АН СССР, 1936.

17. Э. Х. Ленц и Б. С. Якоби. О законах электромагнитов в книге Э. Х. Ленц. *Избранные труды*, ред. чл.-корр. Т. П. Кравец, изд. АН СССР, 1950.

18. Английский перевод книги Г. С. Ома. *Richard Taylor's Sc. Mem.*, т. 2, 401—506, 1841.

19. Решение о наименовании ома единицы электрического сопротивления было принято Международным конгрессом электриков в 1881 г.; еще ранее наименование „омада“, а затем „ом“ было придано единице сопротивления постановлением Брит. ассоциации в 1870 г.

20. J. S. Schweigger's *Schweigg. Journ.*, т. 31, стр. 1821.

21. J. Chr. Poggendorff. *Gilb. Ann.*, т. 57, стр. 422, 1821.

22. H. Davy. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, т. 2, стр. 433, 1821; *Gilb. Ann.*, т. 71, стр. 252, 1822.

23. В. В. Петров. *Известие о гальвани-вольтовых опытах*, СПб., 1803.

24. Я. А. Шнейберг. Об установлении академиком В. В. Петровым закономерности в электрической цепи. *Электричество*, № 11, 1953.

25. G. Touve. *A Forgotten Electrician*. *Science Progress*, стр. 287, XXXI, № 122, 1934.

26. Сборник физических констант. Под редакцией Я. Г. Дорфмана и С. Э. Фриша, Гостехиздат, 1937.

Л. Беранек. *Акустические измерения*, стр. 15, 1952.

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ
Кафедра теоретических основ электротехники
Московского энергетического института
им. Молотова

