



Тайны закона Ома

История великого закона электричества

Повный А. В., преподаватель Филиала БГТУ
«Гомельский государственный политехнический
колледж»

Школа для электрика - <https://electricalschool.info/>

Гомель, 2026

Глава 1. Сын слесаря

Эрланген, 1789 год

Небольшой баварский город Эрланген в конце XVIII века ничем особенным не выделялся среди десятков похожих городков Священной Римской империи. Узкие мощёные улицы, добротные бюргерские дома, университет — основанный всего полвека назад, но уже успевший приобрести скромную репутацию. И мастерская на одной из тихих улочек, где с раннего утра до позднего вечера звенел металл.

Здесь, в семье слесаря и замочного мастера Иоганна Вольфганга Ома, 16 марта 1789 года родился сын — Георг Симон. Через два года появится на свет второй сын, Мартин, которому тоже суждено стать математиком. Судьба братьев Ом — живое свидетельство того, что гений рождается не в профессорских семьях, а там, где есть жажда знания и человек, способный её разжечь.

Отец как первый университет

Иоганн Вольфганг Ом не имел систематического образования, но обладал тем, что во все времена ценится дороже дипломов, — неукрытым любопытством и железной дисциплиной ума. Вечерами, отложив инструменты, он раскрывал книги по математике и философии. Своих сыновей он учил так же, как учил ремеслу: последовательно, терпеливо, требовательно.

К тому времени, когда Георгу исполнилось пятнадцать, отец успел дать ему основательную подготовку по математике, физике и философии — лучше, чем давала большинство тогдашних гимназий. Впоследствии знаменитый математик Карл Христиан фон Лангсдорф, познакомившись с юным Омом, сравнил его с самим Бернулли — и это не было преувеличением вежливости. Он искренне изумился тому, чего сумел достичь сын ремесленника без учителей и академических наставников.

Здесь кроется первый урок, который преподносит нам история закона Ома: фундаментальные открытия совершают люди, умеющие думать своими руками. Буквально. Георг с детства знал, что такое точность — не абстрактная, а та, которую требует токарный станок, где ошибка в долю миллиметра означает брак. Эта культура точного измерения впоследствии стала его главным научным оружием.

Университет и вынужденное странствие

В 1805 году, шестнадцатилетним юношей, Георг поступил в Эрлангенский университет. Казалось, путь открыт. Но отец — человек практичный, несмотря на всю свою любовь к наукам, — рассудил иначе. Он видел, что сын слишком увлёкся студенческими развлечениями в ущерб занятиям, и принял жёсткое решение: отправил его в Швейцарию, в город Готтштадт, работать учителем математики.

Три года в Швейцарии и затем в Нойенбурге стали для Ома школой самодисциплины. Он преподавал, но не переставал учиться — самостоятельно штудировал Эйлера, Лапласа, Лагранжа. Именно тогда сформировалась его привычка работать с математическими текстами так же методично, как отец работал с металлом: разбирать конструкцию до последнего винтика, понимать каждый шаг, не двигаться дальше, пока предыдущее не усвоено до автоматизма.

В 1811 году он вернулся в Эрланген, за три семестра окончил университет и защитил докторскую диссертацию. Ему было двадцать два года. Карьера, казалось, складывалась неплохо — он даже преподавал в родном университете несколько семестров. Но Эрланген был мал, зарплата — ничтожна, а амбиции Ома смотрели далеко за горизонт.

Бамберг и первая попытка

Несколько лет Ом провёл учителем в Бамберге — и эти годы были, пожалуй, самыми мрачными в его жизни. Посредственная гимназия, скучная рутина, никаких условий для исследований. Он написал учебник геометрии — добросовестный, методически выверенный, — но баварское министерство образования встретило его равнодушием. Одна из школ, в которой работал Ом, и вовсе была закрыта из-за реорганизации.

Можно было сломаться. Опустить руки. Признать, что сын слесаря из Эрлангена достиг своего потолка.

Но в 1817 году произошло событие, которое изменило всё: Ому предложили место учителя физики и математики в иезуитской гимназии Кёльна. Это была уже настоящая, хорошо оснащённая школа с приличной физической лабораторией. Впервые в жизни у него появился инструмент, достойный его замыслов.

Навыки, опередившие эпоху

Есть деталь биографии Ома, которую часто упускают в популярных изложениях. Он не просто умел обращаться с приборами — он умел их делать. Навыки токаря, привитые отцом с детства, позволяли ему самостоятельно изготавливать экспериментальное оборудование с такой точностью, какой не мог добиться никто из его современников, не имевших подобной «ремесленной» подготовки.

Это обстоятельство имело решающее значение. Главная проблема физиков-электриков начала XIX века состояла в следующем: измерительные приборы того времени были грубы и ненадёжны, а источники тока — нестабильны. Получить воспроизводимый, точный результат было чрезвычайно трудно. Ом нашёл способ обойти эти ограничения — и его «ремесленное» прошлое сыграло в этом ключевую роль.

Но об этом — в следующей главе. Мы войдём вместе с Омом в его лабораторию в Кёльне, где на деревянном столе лежат тонкие проволоки, стоит термopара и покачивается стрелка гальванометра.

Именно здесь, в тишине провинциальной школы, родился закон, которому суждено было войти в каждый учебник физики на планете.

Глава 2. В гимназии Кёльна

Лаборатория размером со стол

Если бы мы могли перенестись в Кёльн 1820-х годов и заглянуть в физический кабинет иезуитской гимназии, где работал Ом, нас, пожалуй, удивила бы скромность обстановки. Никаких сложных установок, никаких дорогостоящих приборов, никакого штата ассистентов. Деревянный стол, несколько катушек проволоки разной длины и толщины, самодельные держатели, термopара и небольшой гальванометр с крутильной нитью. Вот и весь арсенал человека, которому предстояло сформулировать один из фундаментальных законов физики.

Но не стоит обманываться кажущейся простотой. За каждым из этих предметов стоял тщательный выбор, долгие размышления и — что особенно важно — умение работать руками. Проволоки Ом вытягивал и полировал сам, добиваясь равномерного сечения по всей длине. Держатели изготавливал на токарном станке с аккуратностью часовщика. В этой скрупулёзности и крылся секрет его успеха там, где другие терпели неудачу.

Главный враг точного эксперимента

К началу 1820-х годов электричество уже не было terra incognita. Вольта построил свой столб в 1800 году, Эрстед в 1820-м обнаружил связь между током и магнетизмом, Ампер разрабатывал математическую теорию электромагнетизма. Казалось, самое время заняться количественными измерениями: выяснить, как именно ток зависит от свойств проводника и от величины «движущей силы» — того, что мы сегодня называем напряжением.

Попытки делались. И раз за разом заканчивались одним и тем же разочарованием.

Причина была проста и мучительна: гальванические батареи — главный источник тока в ту эпоху — отличались катастрофической нестабильностью. Напряжение на их клеммах падало уже через несколько минут после начала работы. Электроды поляризовались, электролит истощался, пузырьки газа обволакивали пластины. Нарисуйте себе такую картину: вы пытаетесь измерить, как меняется ток при изменении длины проводника, — но пока вы меняете проводник, сам источник уже даёт другое напряжение. Результаты несопоставимы. Кривые на бумаге превращаются в бессмысленный зигзаг.

Это была не техническая неприятность — это был методологический тупик. И Ом нашёл из него блестящий выход.

Термопара как спасение

Решение пришло из совершенно другой области физики. В 1821 году немецкий физик Томас Иоганн Зеебек открыл термоэлектрический эффект: если соединить два разных металла и поддерживать их спаи при разных температурах, в цепи возникает электрический ток. Причём величина этого тока определяется исключительно разностью температур — и больше ничем.

Ом немедленно оценил революционный смысл этого открытия для своих целей. Термопара — это источник тока, стабильность которого определяется стабильностью температуры. А температуру держать постоянной умели уже в те времена — достаточно опустить один спай в кипящую воду, а другой — в тающий лёд. Разность температур фиксирована: 100 градусов. Напряжение стабильно. Эксперимент воспроизводим.

Это был поворотный момент. Заменяв батарею на термопару, Ом получил именно то, чего ему не хватало: надёжный, воспроизводимый источник «движущей силы». Теперь он мог методично менять одну переменную, фиксируя все остальные, — и получать результаты, которым можно доверять.

Гальванометр с крутильной нитью

Вторым инструментом в руках Ома стал гальванометр — прибор для измерения тока. Но не любой гальванометр, а особый: с крутильной нитью, подобный тому, который Кулон использовал для измерения электростатических сил. В таком приборе ток отклоняет магнитную стрелку, и угол отклонения прямо пропорционален силе тока.

Принципиально важно: Ом не просто использовал готовый прибор. Он сам его усовершенствовал, добившись высокой чувствительности и воспроизводимости показаний. Угол отклонения стрелки он измерял с точностью, недоступной большинству современных ему экспериментаторов. И снова — навыки, привитые в отцовской мастерской, оказались решающими.

Итак, у него была стабильная термopapa и чувствительный гальванометр. Оставалось главное — правильно поставить вопрос.

Вдохновение Фурье

В 1822 году вышел в свет «Аналитическая теория тепла» Жозефа Фурье — один из величайших научных трудов XIX века. Фурье показал, что поток тепла через вещество пропорционален разности температур и обратно пропорционален длине пути — и записал это в виде строгого математического закона. Тепловой поток Q пропорционален градиенту температуры — элегантно, точно, проверяемо.

Ом прочитал Фурье — и его озарило.

Электрический ток — это тоже поток. Поток чего-то (природу этого «чего-то» тогда ещё не понимали, но это не мешало измерять) вдоль проводника. Не может ли этот поток подчиняться той же логике, что и тепловой? Не должна ли «движущая сила» тока относиться к сопротивлению проводника так же, как разность температур — к тепловому сопротивлению?

Это был образцовый пример того, что методологи науки называют **анalogией как эвристическим инструментом**. Ом не просто угадал ответ — он построил гипотезу по образцу уже доказанной теории и пошёл её проверять.

Эксперимент за экспериментом

Методика была такова. Ом брал проволоки одного материала — меди — но разной длины: скажем, 2, 4, 6, 8, 10 сантиметров. Подключал их поочерёдно к термопаре и каждый раз измерял угол отклонения стрелки гальванометра. Затем менял материал — брал железо, платину, серебро. Затем менял толщину проволоки.

Результаты складывались в закономерность с математической неотвратимостью. Удвоить длину проводника — ток уменьшится вдвое. Удвоить поперечное сечение — ток вырастет вдвое. Увеличить «движущую силу» — ток вырастет пропорционально.

Ом записывал данные, строил графики, проверял гипотезу, уточнял формулу. Это была не вспышка вдохновения, а месяцы кропотливой, методической работы — именно того рода, которому его научил отец за токарным станком.

К 1826 году у него была формула. Сначала она выглядела несколько иначе, чем привычная нам сегодня школьная запись, — Ом оперировал понятиями «возбуждающая сила» и «проводимость» вместо «напряжения» и «сопротивления». Но суть была та же самая: ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению.

Тишина перед бурей

К 1827 году Ом был готов представить свои результаты миру. Он написал книгу — «Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet» («Гальваническая цепь, обработанная математически») — и издал её в Берлине.

Он ждал признания. Он получил тишину — а затем нечто значительно худшее.

Но об этом — в следующей главе. Потому что история триумфа без истории поражения — это не история, а легенда. А Ом заслуживает правды.

Глава 3. Провал и триумф

Берлин, 1827 год

Книга вышла в свет весной 1827 года. Небольшой том в твёрдом переплёте, 245 страниц, строгий математический язык, таблицы экспериментальных данных. На титульном листе — имя автора: Георг Симон Ом, учитель физики иезуитской гимназии Кёльна. Не профессор. Не академик. Учитель.

Ом разослал экземпляры коллегам, в университеты, в научные общества. Он был уверен, что сделал нечто важное. Строгое математическое описание электрической цепи, подкреплённое тщательными экспериментами, выполненными с беспрецедентной точностью, — разве это не то, чего давно ждала наука?

Ответа не было. Почти никакого.

Несколько недель Ом открывал почту с нарастающей тревогой. Потом тревога сменилась недоумением. Потом — горьким пониманием того, что произошло.

Анатомия провала

Чтобы понять, почему книга Ома была встречена в штыки, нужно вспомнить интеллектуальную атмосферу немецкой науки 1820-х годов. Это была эпоха расцвета натурфилософии — течения, восходящего к Шеллингу и провозглашавшего, что природу следует познавать

умозрительно, через интуицию и философское созерцание, а не через скучные измерения и математические формулы.

Главным бастионом этого направления в сфере физики был Георг Фридрих Пфафф — влиятельный учёный и чиновник от науки. Именно он произнёс приговор, ставший самой знаменитой научной ошибкой немецкого XIX века. Книга Ома, по его словам, была «недостойна уважаемого учителя» и представляла собой «голую фантазию», порождённую «недостойным стремлением к дешёвой оригинальности». Математика, применённая к электрической цепи, казалась натурфилософам варварством — попыткой втиснуть живую природу в мёртвые символы.

Была и другая причина неприятия, более тонкая. Ом предложил понятие «сопротивление» как объективную, измеримую характеристику проводника. Но в умах большинства физиков того времени электрический ток был связан прежде всего с «возбуждением» и «полярностью» — категориями скорее натурфилософскими, чем количественными. Говорить о токе как о чём-то, что можно вычислить по формуле из двух других чисел, казалось чрезмерным упрощением.

Цена поражения

Удар оказался не только репутационным. Ом, публикуя книгу, рассчитывал на профессорское место в одном из немецких университетов. Именно для этого он и писал — хотел вырваться из гимназии в академическую науку. Провал книги закрыл этот путь наглухо.

Более того: ситуация в Кёльне стала невыносимой. Министерство образования Пруссии, которому подчинялась гимназия, дало понять, что учитель, занимающийся «бесполезными фантазиями» вместо преподавания, — не лучший пример для подражания. Ому дали понять: либо наука, либо должность.

В 1828 году он подал в отставку. Без работы, без дохода, без признания. Ему было тридцать девять лет.

Следующие несколько лет стали, пожалуй, самыми тяжёлыми в его жизни. Он перебивался случайными уроками в Берлине, жил впроголодь, продолжал думать об электричестве, но публиковался мало. В письмах к брату Мартину сквозят усталость и горечь — но никогда отчаяние. Ом не отказывался от своего закона. Он просто ждал.

Признание приходит с запада

Первыми по достоинству оценили работу Ома не немцы, а французы и — особенно — британцы.

В 1825–1826 годах независимо от Ома схожие результаты получил английский физик Питер Барлоу — но его эксперименты были менее строгими, и сам он не придал им должного теоретического оформления. Когда британские физики познакомились с книгой Ома, они поняли: перед ними нечто большее, чем набор экспериментальных данных. Перед ними — закон.

В 1830-е годы закон Ома начал проникать в британские учебники. Его начали цитировать, проверять, применять — и каждая проверка подтверждала его правоту. В 1833 году небольшую, но влиятельную статью в поддержку закона Ома опубликовал Генри Кавендиш — точнее, его рукописи, найденные и изданные Максвеллом, показали, что Кавендиш пришёл к аналогичным выводам ещё в 1781 году, просто не опубликовал их. Это была горькая ирония: закон Ома мог быть открыт на полвека раньше — но лежал в ящике стола.

Между тем в Германии положение медленно менялось. Натурфилософия теряла влияние, уступая место точному естествознанию. Молодые физики — Гаусс, Вебер, Нейман — работали в традиции строгого математического описания природы и смотрели на Ома как на предшественника и союзника.

1841 год: медаль Лондонского королевского общества

30 ноября 1841 года в торжественном зале Лондонского королевского общества президент организации зачитал решение совета: медаль Копли — высшая научная награда Британии, вручавшаяся тогда раз в год, — присуждается Георгу Симону Ому «за установление математического закона электрического тока».

Медаль Копли до Ома получали Эйлер, Франклин, Кавендиш, Дэви, Фарадей. Это была не просто награда — это был приговор истории, вынесенный в пользу кёльнского учителя.

В Германии известие произвело эффект, который можно было бы назвать смешным, если бы он не был таким характерным. Учёные мужи, ещё недавно отвергавшие «фантазии» Ома, вдруг обнаружили, что всегда ценили его работу. Баварское правительство наконец-то вспомнило о своём земляке. В 1841 году Ому предложили — с опозданием на четырнадцать лет — кафедру в Мюнхенском университете. В 1845 году он стал членом Баварской академии наук. В 1852 году, за два года до смерти, получил наконец полноценную профессорскую должность в Мюнхенском университете.

Ом умер 6 июля 1854 года. Ему было шестьдесят пять лет. Признание пришло — но так поздно, что он едва успел насладиться им.

Эпитафия несправедливости

История Ома — не исключение в анналах науки. Мендель умер, не узнав, что его законы наследственности станут основой генетики. Больцман, затравленный критиками его молекулярно-кинетической теории, покончил с собой в 1906 году — за несколько лет до того, как эта теория получила блестящее экспериментальное подтверждение. Земмельвейс, открывший причину родильной горячки, был осмеян коллегами и закончил жизнь в психиатрической лечебнице.

Наука — человеческий институт, со всеми человеческими слабостями: инертностью мышления, корпоративными интересами, боязнью нового. Но у неё есть одно неоспоримое преимущество перед другими человеческими институтами: в конечном счёте она подчиняется не авторитетам, а фактам. Факты оказались на стороне Ома.

Сегодня его имя носит единица электрического сопротивления — Ом. Это, пожалуй, лучший памятник, какой только можно поставить учёному: не мраморная статуя, а живое слово в языке науки, которое произносят каждый день миллионы инженеров, физиков и студентов по всему миру.

Глава 4. Что такое электрический ток?

Вопрос, который кажется простым

Откройте любой школьный учебник физики, и вы найдёте там определение: электрический ток — это упорядоченное движение заряженных частиц. Формально верно. Практически бесполезно — примерно как объяснять вкус мёда словами «сладкое вязкое вещество». Чтобы по-настоящему понять, что происходит внутри проводника, когда через него течёт ток, нам понадобится сначала хорошая аналогия, а затем — спуск на уровень атомов.

Начнём с аналогии. Она настолько удачна, что физики пользуются ею уже полтора века.

Водопровод как модель электрической цепи

Представьте себе систему водопроводных труб. Вода течёт по ним под давлением — от насоса через трубы к потребителю и обратно. Теперь проведём параллели, и вы увидите, насколько точно эта картина описывает электрическую цепь.

Ток — это поток. Как вода течёт по трубе, так электрический ток течёт по проводнику. Количество воды, проходящей через сечение трубы в секунду, — это расход. Количество электрического заряда, проходящего через сечение проводника в секунду, — это сила тока. Единица измерения — ампер: один ампер означает, что каждую секунду

через поперечное сечение проводника проходит заряд в один кулон, то есть примерно $6,24 \times 10^{18}$ электронов. Число астрономическое — но именно такова цена за то, чтобы зажглась обычная лампочка.

Напряжение — это давление. Вода течёт потому, что на входе в трубу давление выше, чем на выходе. Разность давлений — вот что гонит поток. Точно так же электрический ток течёт потому, что на двух концах проводника существует разность электрических потенциалов — то, что мы называем напряжением, или электрическим напряжением. Единица измерения — вольт. Батарейка типа АА создаёт напряжение 1,5 вольта. Розетка в вашей квартире — 220 вольт. Молния — десятки и сотни миллионов вольт.

Сопротивление — это труба. Узкая, длинная, шероховатая труба сильнее препятствует течению воды, чем короткая широкая. Точно так же тонкий длинный проводник сильнее сопротивляется электрическому току, чем толстый короткий. Единица измерения — ом.

Эта аналогия настолько хороша, что на ней строятся целые разделы теории электрических цепей. Но у любой аналогии есть пределы. Вода — это непрерывная жидкость, и мы хорошо знаем, как она выглядит. Электрический ток — это нечто иное. Чтобы понять его природу, нужно заглянуть внутрь металла.

Электроны в металле: моря и ветры

Возьмём кусок медной проволоки. На первый взгляд — однородный металл, ничего особенного. Но если бы мы умели видеть на атомном уровне, картина предстала бы совершенно иной.

Медь — металл. А это означает, что её атомы устроены особым образом: каждый атом меди отдаёт один электрон в общее «коллективное пользование». Эти электроны не принадлежат больше никакому конкретному атому — они свободно блуждают по всему объёму металла, образуя то, что физики называют **электронным газом** или **электронным морем**.

При отсутствии внешнего напряжения это море пребывает в состоянии теплового хаоса. Электроны мчатся во все стороны со скоростями порядка миллиона метров в секунду — но их движение совершенно беспорядочно, и суммарный поток в любом направлении равен нулю. Это похоже на хаотическое броуновское движение: каждая частица движется стремительно, но толпа в целом никуда не идёт.

Теперь подключим к концам проволоки батарейку. Она создаёт между концами проводника разность потенциалов — напряжение. Внутри проводника возникает электрическое поле. И это поле начинает действовать на все свободные электроны одновременно, подталкивая их в определённом направлении.

Почему так медленно?

Здесь нас ждёт один из самых удивительных фактов о природе электрического тока. Скорость, с которой электроны движутся вдоль проводника под действием напряжения, — так называемая **скорость дрейфа** — ничтожно мала. В типичном медном проводнике при токе в один ампер электроны смещаются в направлении тока со скоростью около **0,1 миллиметра в секунду**. Примерно с такой скоростью ползёт улитка.

Как же тогда свет в комнате загорается практически мгновенно, когда вы щёлкаете выключателем?

Ответ в том, что электрическое поле распространяется по проводнику со скоростью, близкой к скорости света, — около 300 000 километров в секунду. Когда вы включаете выключатель, поле мгновенно охватывает всю цепь, и электроны начинают дрейфовать одновременно по всей длине проводника. Это похоже на трубу, полностью заполненную водой: стоит чуть толкнуть воду с одного конца, как она тут же потечёт из другого — хотя сами молекулы воды почти не сдвинутся с места.

Почему возникает сопротивление?

Итак, электроны дрейфуют вдоль проводника. Почему они не разгоняются бесконечно — ведь электрическое поле постоянно их подталкивает?

Потому что на своём пути они непрерывно сталкиваются с препятствиями.

В идеально правильной кристаллической решётке металла при абсолютном нуле температур электрон мог бы двигаться без сопротивления — квантовая механика это допускает. Но реальный металл далёк от идеала. Во-первых, атомы решётки колеблются из-за теплового движения — и чем выше температура, тем сильнее эти колебания, тем чаще они сбивают электроны с курса. Именно поэтому сопротивление большинства металлов **растёт с температурой**: нагрейте нить лампы докрасна — и её сопротивление вырастет в несколько раз по сравнению с холодным состоянием.

Во-вторых, в реальном металле всегда есть примеси и дефекты кристаллической решётки — лишние атомы, вакансии, дислокации. Они тоже рассеивают электроны. Именно поэтому чистая медь проводит ток лучше, чем медный сплав: в сплаве атомы других металлов создают дополнительные центры рассеяния.

Таким образом, электрическое сопротивление — это не какая-то мистическая сила, противодействующая току. Это статистический результат бесчисленных столкновений электронов с несовершенствами кристаллической решётки. Ом, разумеется, ничего этого не знал —

атомная теория металлов была развита на полвека позже. Но его формула описывала именно это явление — с точностью, которая по сей день восхищает физиков.

Аналогия и реальность

Вернёмся к нашему водопроводу. Аналогия работает прекрасно для понимания закона Ома — но она скрывает одну тонкость. В трубе течёт вода, которую мы видим и можем потрогать. В проводнике «текут» электроны — частицы, подчиняющиеся законам квантовой механики и ведущие себя порой совершенно непривычным образом.

Например: в металле ток несут отрицательно заряженные электроны, которые движутся от минуса к плюсу. Но исторически сложилось так, что направление тока договорились считать противоположным — от плюса к минусу. Это чисто историческая условность, восходящая к Франклину и Вольту, которые не знали об электронах. Сегодня она иногда вызывает путаницу у студентов — но физике от этого ни холодно ни жарко: математика одинаково работает в обоих направлениях.

Важно другое: под кажущейся простотой формулы $I = U/R$ скрывается богатейший мир физических явлений — от тепловых колебаний решётки до квантовых эффектов в наноструктурах. Ом нашёл математическое описание этого мира, не зная о его существовании. Это и есть

подлинное величие эмпирического закона: он работает независимо от того, понимаем мы его глубинный механизм или нет.

Глава 5. Формула, которую знают все

Три буквы, одна дробь

Есть формулы, которые знают только специалисты. Есть формулы, которые знают все образованные люди. И есть совсем небольшая группа формул, которые знает буквально каждый, кто хоть раз открывал учебник физики — вне зависимости от страны, языка и эпохи. Закон Ома входит в эту последнюю, самую избранную категорию.

$$I = \frac{U}{R}$$

Три символа. Одна операция деления. Но за этой лаконичностью скрывается строгий физический смысл, который стоит разобрать не торопясь — потому что по-настоящему понять формулу значит увидеть в ней не просто рецепт для вычислений, а описание реального явления природы.

Что означает каждая буква

I — сила тока. Буква I происходит от латинского слова *intensitas* — интенсивность. Сила тока показывает, какой электрический заряд

проходит через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Формально:

$$I = \frac{q}{t}$$

где q — заряд в кулонах, t — время в секундах. Единица измерения — **ампер** (А). Один ампер — это один кулон в секунду. Для понимания масштабов: через нить лампочки накаливания мощностью 100 ватт при напряжении 220 вольт течёт ток примерно 0,45 ампера. Через электрочайник — 5–6 ампер. Через стартер автомобильного двигателя в момент запуска — до 200 ампер. Через канал молнии — десятки тысяч ампер, но лишь на доли секунды.

U — напряжение. Буква U происходит от немецкого *Unterschied* — разность, различие. В русской традиции иногда пишут V (от *Volt*) или E , но международный стандарт закрепил именно U . Напряжение — это разность электрических потенциалов между двумя точками цепи. Именно оно является «движущей силой», которая гонит ток по проводнику. Единица измерения — **вольт** (В). Один вольт — это такая разность потенциалов, при которой для перемещения заряда в один кулон из одной точки в другую совершается работа в один джоуль.

R — сопротивление. Буква R от английского и французского *resistance*. Сопротивление характеризует способность проводника противодействовать прохождению тока. Единица измерения — **ом** (Ω ,

греческая буква омега). Один ом — это такое сопротивление, при котором напряжение в один вольт вызывает ток в один ампер. Сопротивление зависит от материала проводника, его длины, площади поперечного сечения и температуры. Формула:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

где ρ — удельное сопротивление материала (характеристика вещества), l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения. Отсюда сразу видно: длиннее проводник — больше сопротивление; толще проводник — меньше сопротивление. Именно поэтому провода высоковольтных линий электропередачи делают толстыми — чтобы снизить потери энергии на нагрев.

Три формы одного закона

Закон Ома — это не одна формула, а три эквивалентных записи, каждая из которых удобна в своей задаче:

$$I = \frac{U}{R}$$

$$U = I \cdot R$$

$$R = \frac{U}{I}$$

Хотите найти ток — берите первую. Хотите узнать напряжение на участке цепи — вторую. Хотите вычислить сопротивление — третью. Это один и тот же закон, записанный с разными «неизвестными». Начинающие студенты иногда путаются, воспринимая эти три формулы как три разных закона, — на самом деле это одно утверждение, просто повернутое разными гранями.

Закон для полной цепи

Формула $I = U/R$ описывает так называемый **закон Ома для участка цепи** — то есть для любого фрагмента электрической схемы, не содержащего источника тока. Но что происходит, когда мы рассматриваем полную цепь — включая сам источник?

Любой реальный источник тока — батарейка, аккумулятор, генератор — обладает собственным внутренним сопротивлением r . Это сопротивление обусловлено физическими процессами внутри источника: сопротивлением электролита в батарейке, обмоток в генераторе. Когда ток течёт через источник, часть напряжения «теряется» на преодоление этого внутреннего сопротивления.

Поэтому закон Ома для полной цепи записывается иначе:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

где \mathcal{E} — электродвижущая сила (ЭДС) источника, R — сопротивление внешней цепи, r — внутреннее сопротивление источника. ЭДС — это не напряжение, хотя измеряется тоже в вольтах. Это максимальное напряжение, которое источник способен создать, если через него не течёт ток. Как только ток пошёл — часть ЭДС «падает» на внутреннем сопротивлении, и напряжение на клеммах источника становится меньше ЭДС.

Именно поэтому севшая батарейка при подключении вольтметра показывает почти нормальное напряжение — а при подключении нагрузки напряжение резко проседает. Внутреннее сопротивление состарившейся батарейки выросло настолько, что поглощает большую часть ЭДС. Закон полной цепи объясняет это мгновенно.

Люди за единицами измерения

Три единицы, фигурирующие в законе Ома, носят имена трёх великих учёных — и каждое из этих имён заслуживает отдельного слова.

Андре-Мари Ампер (1775–1836) — французский физик и математик, один из основателей электродинамики. Именно он превратил открытие Эрстеда о связи тока и магнетизма в строгую математическую теорию. Ампер работал с такой скоростью, что за одну неделю после сообщения Эрстеда успел не только воспроизвести опыт, но и сформулировать закон взаимодействия токов. Современники называли его «Ньютоном электричества». Рассеянность Ампера вошла в легенду:

однажды он написал формулу на чёрной карете, приняв её за доску, — и пошёл за ней пешком по улице Парижа, не отрывая взгляда от уравнений.

Алессандро Вольта (1745–1827) — итальянский физик, создатель первого химического источника тока. В 1800 году он собрал «вольтов столб» — стопку чередующихся дисков из цинка и меди, разделённых влажными прокладками, — и получил первый в истории стабильный электрический ток. Наполеон Бонапарт лично присутствовал на демонстрации вольтова столба и был так восхищён, что возвёл Вольта в графское достоинство. Именно в честь этого столба единица напряжения получила своё имя.

Георг Симон Ом (1789–1854) — о нём мы уже знаем достаточно. Добавим лишь, что единица его имени была официально принята Международным конгрессом электриков в Париже в 1881 году — через двадцать семь лет после смерти учёного. На том же конгрессе были утверждены ампер, вольт и фарад. Это был первый в истории международный стандарт электрических единиц — фундамент, на котором выстроена вся современная электротехника.

Закон Ома в работе: примеры

Абстрактные формулы оживают, когда их применяют к конкретным задачам. Рассмотрим несколько примеров из повседневной жизни.

Пример 1. Через лампочку карманного фонарика течёт ток 0,3 А при напряжении батарейки 4,5 В. Каково сопротивление нити накаливания?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4,5}{0,3} = 15 \text{ Ом}$$

Пример 2. Электрический чайник имеет сопротивление нагревательного элемента 40 Ом. Какой ток течёт через него при напряжении 220 В?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ А}$$

Пример 3. Аккумулятор с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом подключён к нагрузке сопротивлением 5,5 Ом. Каков ток в цепи и каково напряжение на клеммах аккумулятора?

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{12}{5,5 + 0,5} = \frac{12}{6} = 2 \text{ А}$$

Напряжение на клеммах:

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r = 12 - 2 \cdot 0,5 = 11 \text{ В}$$

Один вольт «потерян» на внутреннем сопротивлении. Именно это происходит при запуске холодного двигателя зимой: внутреннее сопротивление подмёрзшего аккумулятора резко растёт, напряжение на клеммах проседает, стартер крутит вяло.

Элегантность как признак истины

Физики давно заметили: фундаментальные законы природы, как правило, элегантны. Уравнения Максвелла, уравнение Шрёдингера, $E = mc^2$ — все они лаконичны, симметричны, красивы в математическом смысле. Закон Ома не исключение.

Его красота — в предельной ясности: ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению. Никаких квадратов, никаких логарифмов, никаких специальных функций. Прямая пропорциональность — самая простая из всех возможных математических связей. Именно поэтому график зависимости тока от напряжения для омического проводника — прямая линия, проходящая через начало координат. Её наклон равен величине, обратной сопротивлению, — проводимости $G = 1/R$.

Эта прямая линия на графике стала одним из первых строгих доказательств того, что электричество подчиняется математике. Ом нарисовал её в своей кёльнской лаборатории — и тем самым открыл дверь, через которую в физику электричества вошла точная наука.

Глава 6. Когда закон «не работает»

Прямая линия и её нарушители

В конце предыдущей главы мы говорили о графике зависимости тока от напряжения — прямой линии, которая стала символом закона Ома. Но что если взять не медную проволоку, а, скажем, обычный диод из любого электронного устройства — и снять такой же график?

Прямой линии не получится.

Вместо неё на бумаге появится странная кривая: при одном направлении напряжения ток растёт стремительно, почти по экспоненте; при обратном — остаётся практически нулевым. Закон Ома здесь явно не работает. Но это не означает, что природа нарушила какой-то фундаментальный принцип. Это означает лишь одно: закон Ома — не абсолютный закон мироздания, а **приближённая модель**, справедливая для определённого класса материалов и условий.

Понять границы применимости закона — значит понять его глубже. Именно этому посвящена настоящая глава.

Омические и неомические проводники

Все проводники делятся на два принципиально разных класса.

Омические проводники — те, для которых отношение U/I остаётся постоянным при любом напряжении и токе. График $I(U)$ для них —

прямая линия. Это большинство металлов при постоянной температуре: медь, алюминий, серебро, золото, железо. Именно для них закон Ома выполняется в полной мере.

Неомические проводники — те, для которых U/I меняется в зависимости от условий. Их в природе и технике значительно больше, чем принято думать. Рассмотрим самые важные примеры.

Лампа накаливания: сопротивление, которое растёт

Возьмём обычную лампу накаливания. В холодном состоянии её нить из вольфрама имеет сопротивление около 30–50 Ом. Когда лампу включают в сеть 220 вольт, через нить начинает течь ток — нить разогревается до 2500–3000 кельвинов и начинает светиться.

Но вот в чём парадокс: при такой температуре сопротивление вольфрамовой нити вырастает в 10–15 раз по сравнению с холодным состоянием и достигает 400–600 Ом. Это означает, что в момент включения лампы через неё течёт ток, в десять раз превышающий рабочий — так называемый **пусковой ток**. Именно поэтому лампы накаливания чаще всего перегорают в момент включения, а не во время работы: холодная нить с малым сопротивлением получает кратковременный токовый удар.

Если построить график $I(U)$ для лампы накаливания, он окажется не прямой, а кривой — нарастающей, но с уменьшающимся наклоном: чем выше напряжение, тем горячее нить, тем выше её сопротивление,

тем меньше ток по сравнению с тем, что предсказывал бы «наивный» закон Ома. Формально можно говорить о сопротивлении лампы в каждый конкретный момент — но это сопротивление не постоянно.

Диод: вентиль для тока

Полупроводниковый диод — один из краеугольных камней современной электроники — являет собой образцовый пример неомического проводника.

Диод изготавливается из полупроводника — чаще всего кремния — с двумя зонами разного типа проводимости: р-типа и n-типа. На границе этих зон возникает так называемый р-n переход, обладающий поразительным свойством: он пропускает ток практически без сопротивления в одном направлении — и блокирует его в другом.

При прямом включении (плюс к р-зоне) ток нарастает по экспоненциальному закону Шокли:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

где e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, I_0 — ток насыщения. Никакой прямой пропорциональности — чистая экспонента. При обратном включении через диод течёт ничтожно малый ток утечки — до тех пор, пока напряжение

не достигнет напряжения пробоя, после которого ток резко возрастает.

Именно эта несимметричность делает диод незаменимым: он превращает переменный ток в постоянный (выпрямление), защищает цепи от неправильной полярности, является основой всей цифровой электроники. И всё это — благодаря тому, что диод категорически отказывается подчиняться закону Ома.

Плазма: проводник без правил

Ещё один выдающийся нарушитель закона Ома — плазма, четвёртое агрегатное состояние вещества. Плазма — это ионизированный газ, в котором свободно движутся и электроны, и положительные ионы.

В плазме нет кристаллической решётки, нет фиксированных центров рассеяния — и сопротивление плазмы ведёт себя совершенно иначе, чем сопротивление металла. В частности, сопротивление плазмы **падает** с ростом температуры — прямо противоположно тому, что происходит в металлах. Это связано с тем, что при высоких температурах степень ионизации растёт, концентрация свободных носителей заряда увеличивается, и проводимость возрастает.

Именно поэтому дуговой разряд — например, в сварочном аппарате или в ксеноновой лампе — обладает так называемой **отрицательной вольт-амперной характеристикой**: чем больше ток, тем

меньше напряжение, необходимое для его поддержания. Такой проводник без ограничивающего резистора в цепи немедленно «убегает» в режим неуправляемого нарастания тока. Поэтому любой дуговой разряд требует балластного сопротивления или дросселя — «поводка», удерживающего плазму в разумных пределах.

Переменный ток: рождение импеданса

До сих пор мы говорили о постоянном токе. Но большинство реальных электрических систем — от розетки в вашей квартире до радиоантенны — работают на переменном токе. И здесь закон Ома приобретает совершенно новое измерение.

При переменном токе роль сопротивления играет **импеданс** Z — комплексная величина, которая включает в себя не только активное сопротивление R , но и **реактивное сопротивление** X :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Реактивное сопротивление возникает из-за того, что катушки индуктивности и конденсаторы реагируют на переменный ток иначе, чем на постоянный.

Катушка индуктивности при постоянном токе ведёт себя почти как обычный проводник — её сопротивление определяется только сопротивлением провода. Но при переменном токе она создаёт **индуктивное реактивное сопротивление**:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

где f — частота тока, L — индуктивность. Чем выше частота — тем выше сопротивление катушки. На радиочастотах катушка становится практически непроницаемой для тока — и именно это свойство используется в фильтрах и колебательных контурах.

Конденсатор ведёт себя ровно наоборот. Для постоянного тока он — разрыв цепи, бесконечное сопротивление. Для переменного — его **ёмкостное реактивное сопротивление**:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

падает с ростом частоты. На высоких частотах конденсатор почти прозрачен для тока.

Обобщённый закон Ома для переменного тока записывается так:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Формула внешне идентична закону Ома для постоянного тока — но теперь Z — это не просто число, а комплексная величина, несущая информацию не только об амплитуде, но и о **фазовом сдвиге** между током и напряжением. Именно на этом фазовом сдвиге построена вся техника резонансных контуров, фильтров, трансформаторов и антенн.

Квантовый мир: сопротивление исчезает

Самое драматическое нарушение закона Ома происходит при сверхнизких температурах.

В 1911 году нидерландский физик Хейке Камерлинг-Оннес охлаждал ртуть до температуры жидкого гелия — около 4 кельвинов — и наблюдал за её сопротивлением. При достижении критической температуры 4,15 К произошло нечто невероятное: сопротивление ртути упало до **абсолютного нуля**. Не просто стало очень маленьким — именно до нуля, с точностью любых измерений.

Это явление получило название **сверхпроводимости**. В сверхпроводящем состоянии закон Ома теряет смысл: при $R = 0$ формула $I = U/R$ превращается в неопределённость. В сверхпроводнике ток может течь вечно — без всякого напряжения, без источника, без потерь. Кольцо из сверхпроводящего материала, по которому пустили ток, будет поддерживать его сколь угодно долго после отключения источника — экспериментально подтверждённое время «жизни» такого тока составляет тысячи лет.

Квантовая теория сверхпроводимости, созданная в 1957 году Бардиным, Купером и Шриффером (теория БКШ), объяснила этот феномен: при низких температурах электроны в металле образуют так называемые **куперовские пары** — квантово-механически связанные

состояния, которые движутся через решётку без рассеяния. Куперовская пара — это не классическая частица: она подчиняется законам квантовой статистики и «просачивается» сквозь кристаллическую решётку как волна, не замечая дефектов.

Сверхпроводимость сегодня — не экзотика лабораторий, а реальная технология. Магниты из сверхпроводящих материалов создают поля, необходимые для работы томографов МРТ, ускорителей частиц и установок термоядерного синтеза. Поезда на магнитной подвеске маглев используют сверхпроводящие катушки для левитации. И каждый раз, когда инженер работает с такой системой, он сознательно выходит за границы закона Ома — туда, где физика становится ещё более удивительной.

Граница как источник знания

История науки полна примеров того, как изучение границ применимости закона оказывается плодотворнее, чем изучение самого закона. Именно там, где прямая линия на графике $I(U)$ начинает изгибаться, рождаются диоды, транзисторы, лазеры и сверхпроводящие магниты.

Закон Ома не «сломан» там, где он не работает. Он просто указывает пальцем на нечто более глубокое — на квантовую природу вещества, на коллективные эффекты в электронном газе, на принципиально новые физические состояния. В этом смысле его «нарушения»

— не слабость, а достоинство: хороший закон природы всегда знает свои границы.

Глава 7. В каждом доме

Невидимая физика повседневности

Каждое утро, когда вы включаете чайник, зажигаете свет или заряжаете телефон, закон Ома молча выполняет свою работу. Он не требует вашего внимания и не нуждается в признании — он просто работает, с точностью физического закона обеспечивая то, что мы привыкли называть бытовым комфортом. Но стоит заглянуть за розетку, за щиток на лестничной площадке, за провода в стенах — и обнаружится целая инженерная вселенная, построенная на трёх буквах.

Эта глава — о том, как закон Ома живёт в вашем доме. Буквально в каждой стене.

Почему нельзя включить 10 кВт в розетку на 16 А

Начнём с вопроса, который кажется сугубо практическим, но имеет строгое физическое основание.

Стандартная бытовая розетка в России рассчитана на ток 16 ампер при напряжении 220 вольт. Какова максимальная мощность, которую можно от неё получить? Вспомним формулу мощности:

$$P = U \cdot I = 220 \cdot 16 = 3520 \text{ Вт} \approx 3,5 \text{ кВт}$$

Это и есть предел. Электрический чайник потребляет около 2 кВт — укладывается. Микроволновка — 1,5 кВт — тоже нормально. Но если вы попытаетесь подключить к одной розетке, скажем, мощный строительный фен на 2 кВт и одновременно масляный обогреватель на 2,5 кВт — суммарная мощность составит 4,5 кВт, а ток превысит 20 ампер. Провода начнут греться.

Почему греются? Закон Ома даёт ответ немедленно. Любой провод обладает сопротивлением — пусть небольшим, но ненулевым. Мощность, рассеиваемая на этом сопротивлении в виде тепла, определяется формулой:

$$P_{\text{потерь}} = I^2 \cdot R$$

Обратите внимание: мощность потерь пропорциональна **квадрату тока**. Это критически важно. Если ток вырастает вдвое — потери на нагрев растут вчетверо. Если втрое — вдевятьеро. При токе 20 ампер вместо допустимых 16 потери на нагрев провода вырастают в $(20/16)^2 = 1,56$ раза. Провод греется сильнее, изоляция размягчается, может возникнуть короткое замыкание. А там — пожар.

Именно поэтому сечение провода подбирается строго под допустимый ток. Медный провод сечением 1,5 мм² выдерживает 16 А. Провод сечением 2,5 мм² — уже 25 А. Провод для электроплиты — 6 мм² и 40 А. Это не произвольные цифры — это закон Ома, воплощённый в стандарты электромонтажа.

Предохранители и автоматы: сторожа закона

Человек несовершенен. Он может забыть отключить прибор, подключить слишком много нагрузок к одной линии, случайно повредить изоляцию провода. Поэтому в каждой электрической сети есть устройства, которые отслеживают ток и отключают цепь, когда он выходит за допустимые пределы.

Простейшее из них — **плавкий предохранитель**. Его принцип работы — чистый закон Ома в действии. Внутри предохранителя находится тонкая проволочка из легкоплавкого сплава — как правило, свинцово-оловянного. Сечение этой проволочки подобрано так, что при допустимом токе она нагревается незначительно. Но при превышении тока — снова вспомним формулу $P = I^2R$ — нагрев резко возрастает, проволочка достигает точки плавления и разрывает цепь. Жертвует собой, чтобы спасти всё остальное.

Современные **автоматические выключатели** работают по двум принципам одновременно. Первый — тепловой: биметаллическая пластина, нагреваясь при длительном токе перегрузки, изгибается и размыкает контакты. Второй — электромагнитный: при коротком замыкании ток нарастает настолько стремительно, что электромагнит мгновенно — за доли секунды — выбивает контакты. Тепловая

защита срабатывает медленно, но реагирует на длительную перегрузку. Электромагнитная — молниеносно, но только при очень больших токах.

Выбор номинала автомата — тоже задача на закон Ома. Для линии освещения с медным проводом 1,5 мм² ставят автомат на 10 А. Для розеточной группы с проводом 2,5 мм² — на 16 А. Для электроплиты с проводом 6 мм² — на 32–40 А. Автомат всегда должен защищать **провод**, а не прибор: его задача — отключить цепь раньше, чем провод начнёт плавиться.

Короткое замыкание: когда R стремится к нулю

Среди всех аварийных ситуаций в электросети короткое замыкание — самая опасная. И именно оно наиболее наглядно демонстрирует, что происходит, когда в формуле $I = U/R$ знаменатель стремится к нулю.

Представьте: провод в стене повредила мышь, перегрызая изоляцию. Фазный и нулевой проводники соприкоснулись. Сопротивление цепи мгновенно упало до долей ома — сопротивления самих проводов. При напряжении 220 вольт и сопротивлении 0,05 Ом ток составит:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{0,05} = 4400 \text{ А}$$

Четыре тысячи четыреста ампер. Это в триста раз больше допустимого тока для бытовой линии. Мощность, выделяемая в месте замыкания:

$$P = I^2 \cdot R = 4400^2 \cdot 0,05 = 968\,000 \text{ Вт} \approx 1 \text{ МВт}$$

Почти мегаватт тепла — сосредоточенный в точке размером с горошину. Металл мгновенно испаряется, возникает дуговой разряд с температурой до 6000 кельвинов. Если автомат не сработает за доли секунды — пожар неизбежен.

Именно поэтому требования к электромонтажу так строги. Именно поэтому нельзя использовать алюминиевую фольгу вместо предохранителя — так называемую «жучку». Алюминиевая фольга выдержит любой ток — и тем самым лишит сеть последней защиты от катастрофы. Это не просто нарушение правил — это игра со смертью, основанная на незнании закона Ома.

Потери при передаче энергии: почему 220, а не 12 вольт

Вернёмся к формуле тепловых потерь $P = I^2R$ и зададим вопрос: как передать электроэнергию от электростанции к потребителю с минимальными потерями?

Допустим, нужно передать мощность 1000 кВт на расстояние 100 км. Провода имеют суммарное сопротивление 10 Ом. Если передавать при напряжении 1000 В, ток составит:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1\,000\,000}{1000} = 1000 \text{ A}$$

Потери: $P_{\text{потерь}} = 1000^2 \cdot 10 = 10\,000\,000 \text{ Вт} = 10 \text{ МВт}$. Это в десять раз больше, чем мы хотим передать — бессмыслица.

Теперь повысим напряжение до 100 000 В (100 кВ) — именно столько используется в высоковольтных линиях электропередачи:

$$I = \frac{1\,000\,000}{100\,000} = 10 \text{ A}$$

Потери: $P_{\text{потерь}} = 10^2 \cdot 10 = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт}$. Всего 0,1% от передаваемой мощности.

Вот почему электростанции повышают напряжение до сотен тысяч вольт перед передачей по линиям электропередачи — и понижают до 220 вольт у потребителя через систему трансформаторов. Это прямое следствие закона Ома: при высоком напряжении ток мал, потери пропорциональны квадрату тока — значит, потери ничтожны. Без этого принципа современная энергетика была бы невозможна.

Заземление: третий провод, который спасает жизни

В современной бытовой электросети три провода: фазный, нулевой и **защитное заземление**. Последний — жёлто-зелёный провод — часто воспринимается как необязательный атрибут. На самом деле он реализует ещё один принцип, прямо вытекающий из закона Ома.

Если изоляция электроприбора повреждена и его металлический корпус оказался под напряжением — прикосновение к нему опасно для жизни. Сопротивление тела человека составляет от 1000 до 100 000 Ом в зависимости от состояния кожи и влажности. При напряжении 220 вольт через тело может потечь ток:

$$I = \frac{220}{1000} = 0,22 \text{ A} = 220 \text{ mA}$$

Ток в 100 мА уже смертелен — он вызывает фибрилляцию желудочков сердца.

Защитное заземление соединяет корпус прибора с землёй — проводником с сопротивлением, близким к нулю. Если корпус оказался под напряжением, ток устремляется не через человека, а через заземляющий провод — где немедленно вызывает срабатывание автомата или устройства защитного отключения (УЗО). Человек остаётся жив. Закон Ома здесь буквально спасает жизни — ток всегда идёт по пути наименьшего сопротивления.

Дом как электрическая схема

Если взглянуть на квартиру глазами физика, она предстаёт как сложная электрическая схема. Все розетки в одной комнате подключены **параллельно** — каждая получает полные 220 вольт независимо

от того, сколько приборов работает. Именно параллельное соединение используется повсюду в бытовой проводке: оно обеспечивает одинаковое напряжение для всех потребителей.

При параллельном соединении полное сопротивление цепи **уменьшается** с каждым добавленным прибором:

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Именно поэтому, когда вы включаете в одну розетку удлинитель с несколькими приборами, общий ток в подводящем проводе растёт — хотя каждый прибор получает те же 220 вольт. И именно поэтому провод удлинителя может перегреться, даже если каждый отдельный прибор укладывается в норму.

Последовательное соединение в бытовой проводке встречается реже — его можно увидеть в гирляндах старого типа, где перегорание одной лампочки гасит всю гирлянду: цепь разорвана. Современные гирлянды делают с шунтирующими резисторами именно для того, чтобы избежать этого неудобства.

Физика за плинтусом

Закон Ома пронизывает бытовую электрику насквозь — от расчёта сечения проводов до выбора номинала предохранителя, от понимания опасности короткого замыкания до проектирования системы

заземления. Каждый электрик, монтирующий проводку, — практикующий физик, даже если он никогда не открывал учебник. Его профессиональная интуиция — это закон Ома, усвоенный через опыт.

Но бытовая электрика — лишь одна из бесчисленных областей, где живёт этот закон. В следующей главе мы покинем привычное пространство квартиры и отправимся туда, где закон Ома работает в самых неожиданных и захватывающих контекстах: в транзисторах размером с атом, в кардиостимуляторах, бьющихся в такт с человеческим сердцем, и в земных недрах, которые геофизики «просвечивают» электрическим током.

Глава 8. В технике и науке

От формулы до цивилизации

Есть соблазн считать закон Ома «школьной физикой» — чем-то, что нужно знать для экзамена, но что остаётся за порогом реальной науки и серьёзной техники. Эта глава существует именно для того, чтобы разрушить это заблуждение раз и навсегда.

Закон Ома — не стартовая площадка, с которой физика улетает куда-то в высоты квантовой механики и теории относительности. Он встроен в самую ткань современной цивилизации — в кремниевые чипы, в медицинские приборы, в геофизические зонды. Он работает

там, где его присутствие совсем не очевидно, и именно это делает его по-настоящему великим.

Электроника: закон Ома в мире транзисторов

Современный процессор содержит до 100 миллиардов транзисторов на площади ногтя. Каждый транзистор — крошечный управляемый переключатель, способный пропускать или блокировать ток по команде управляющего сигнала. Но прежде чем понять транзистор, нужно понять его предка — и именно здесь закон Ома выходит на сцену.

Простейшая транзисторная схема — **усилитель на основе биполярного транзистора** — работает следующим образом. Транзистор имеет три вывода: базу, коллектор и эмиттер. Небольшой ток, втекающий в базу, управляет значительно большим током, текущим из коллектора в эмиттер. Коэффициент усиления по току — β — может составлять от десятков до сотен.

Но как инженер рассчитывает рабочую точку транзистора — то напряжение и ток, при которых он работает оптимально? Именно с помощью закона Ома. Резисторы в цепи базы задают нужное напряжение смещения. Резистор в цепи коллектора преобразует ток в напряжение. Вся схема — это система уравнений закона Ома, решённая относительно нужных параметров.

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПИТ}} - I_{\text{К}} \cdot R_{\text{К}}$$

Это уравнение нагрузочной прямой — один из фундаментальных инструментов схемотехники. Оно прямо вытекает из закона Ома и определяет, как транзистор будет вести себя в конкретной схеме. Тысячи инженеров рисуют эту прямую каждый день — от студентов на лабораторных до разработчиков в Intel и Samsung.

Микросхема: миллиарды омов в кармане

Интегральная микросхема — это, по существу, тысячи или миллионы резисторов, конденсаторов, диодов и транзисторов, соединённых в единую схему на одном кристалле кремния. Каждое соединение — тонкая дорожка из алюминия или меди, обладающая определённым сопротивлением. Каждый транзистор в открытом состоянии — резистор с малым сопротивлением, в закрытом — с огромным.

Когда инженер проектирует микросхему, он решает тысячи задач на закон Ома одновременно — с помощью программ автоматического проектирования, которые численно интегрируют системы уравнений Кирхгофа. Законы Кирхгофа, в свою очередь, — это обобщение закона Ома на произвольные электрические цепи.

Первый закон Кирхгофа: сумма токов, втекающих в узел, равна сумме токов, вытекающих из него. Второй: сумма напряжений по любому замкнутому контуру цепи равна нулю. Вместе с законом Ома они образуют полную систему, позволяющую рассчитать любую, сколь

угодно сложную электрическую цепь — от детекторного приёмника до суперкомпьютера.

Современная электроника немыслима без понимания того, что происходит с сигналом при прохождении через цепочку резисторов, как делитель напряжения формирует нужный уровень сигнала, почему паразитные сопротивления дорожек на плате влияют на скорость работы высокочастотных схем. Всё это — закон Ома, только в очень большом масштабе и с очень маленькими деталями.

Медицина: физика на службе жизни

Переступим порог больницы. Здесь закон Ома работает в буквальном смысле слова вопрос жизни и смерти.

ЭКГ: слушая сердце через сопротивление тела

Сердце — электрический орган. Каждое его сокращение инициируется волной электрического возбуждения, пробегающей по миокарду. Эта волна создаёт на поверхности тела крошечные разности потенциалов — от долей до нескольких милливольт.

Электрокардиограф регистрирует именно эти потенциалы. Но тело человека — не идеальный проводник: разные его ткани имеют разное сопротивление. Мышцы проводят ток хорошо, жировая ткань — хуже, кости — плохо, лёгкие с воздухом — почти не проводят. Расположение электродов на теле и интерпретация сигналов ЭКГ — это

задача об электрической цепи с распределёнными параметрами, где закон Ома работает в каждой точке ткани.

Когда кардиолог видит на ЭКГ подъём сегмента ST — признак инфаркта — он наблюдает изменение картины электрических потенциалов, вызванное тем, что ишемизированный участок миокарда изменил своё электрическое сопротивление. Закон Ома превращает физиологическое событие в диагностический сигнал.

Дефибриллятор: удар, возвращающий ритм

При фибрилляции желудочков сердце перестаёт сокращаться синхронно — его мышечные волокна подёргиваются хаотически, не создавая полезного насосного действия. Единственный способ восстановить синхронизацию — пропустить через сердце мощный электрический разряд, который «перезагрузит» электрическую активность всего миокарда.

Дефибриллятор заряжает конденсатор до напряжения 2000–5000 вольт и разряжает его через грудную клетку пациента за несколько миллисекунд. Сопротивление грудной клетки составляет обычно 50–150 Ом. По закону Ома ток через сердце составит:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3000}{75} \approx 40 \text{ А}$$

Сорок ампер через живое сердце — звучит чудовищно. Но длительность импульса составляет всего 10–20 миллисекунд, и суммарный заряд оказывается вполне переносимым для здоровых тканей. Современные дефибрилляторы умеют измерять сопротивление грудной клетки пациента перед разрядом — и автоматически подбирают напряжение так, чтобы ток через сердце попал в оптимальный терапевтический диапазон. Это называется **импедансная компенсация** — и это прямое применение закона Ома в реальном времени.

Кохлеарный имплант: звук из тока

Кохлеарный имплант — устройство, возвращающее слух людям с глубокой глухотой, вызванной повреждением волосковых клеток улитки. Имплант обходит повреждённые клетки и напрямую стимулирует слуховой нерв электрическими импульсами.

Внутри улитки размещается цепочка из 12–22 электродов, каждый из которых стимулирует определённую группу нервных волокон, отвечающих за определённые частоты. Процессор за ухом анализирует звук, разбивает его на частотные полосы и генерирует соответствующие токовые импульсы для каждого электрода.

Ключевая инженерная задача: ткани улитки имеют сложное, неоднородное сопротивление — и оно меняется с течением времени по мере заживления и формирования рубцовой ткани вокруг электродов.

Система управления имплантом постоянно измеряет импеданс каждого электрода и корректирует параметры стимуляции. Снова — закон Ома, теперь уже в нанофарадах и килоомах живой ткани.

Геофизика: просвечивая Землю током

Спустимся с операционного стола — и погрузимся в землю. Буквально.

Метод **электрического зондирования** — один из главных инструментов геофизической разведки. Идея проста и элегантна: если пропустить ток через земную породу и измерить возникающее напряжение, можно по закону Ома вычислить сопротивление породы. А сопротивление — характерная метка: нефтяной пласт, водоносный горизонт, рудное тело, соляной купол — каждый из них имеет свой электрический «отпечаток».

На практике это выглядит так. В землю вбивают четыре электрода, расставленных на определённых расстояниях. Через внешнюю пару пропускают известный ток I . На внутренней паре измеряют напряжение U . Отношение U/I — это **кажущееся сопротивление**, которое зависит от расстояния между электродами и от электрических свойств пород на разных глубинах.

$$\rho_k = k \cdot \frac{U}{I}$$

где k — геометрический коэффициент, зависящий от расстановки электродов. Варьируя расстояние между электродами, геофизики «зондируют» разные глубины: чем дальше разнесены электроды, тем глубже проникает ток, тем о более глубоких горизонтах несёт информацию измерение. Так строится разрез электрического сопротивления земной коры — своеобразная томограмма недр.

Метод работает в самых разных масштабах. На небольших глубинах (до 20–30 метров) он помогает найти воду для колодца или выявить карстовые полости под строительной площадкой. На глубинах в сотни метров — обнаружить рудные залежи. На глубинах в десятки километров — изучить строение земной коры и литосферы. Один и тот же принцип, одна и та же формула — только масштаб меняется.

Материаловедение: измеряя чистоту металла

Закон Ома служит и инструментом контроля качества материалов. Удельное сопротивление металла чрезвычайно чувствительно к его составу и структуре: даже доли процента примесей заметно меняют проводимость. Это позволяет использовать электрические измерения для оценки чистоты металла — быстро, точно и без разрушения образца.

Именно так контролируется качество меди для электротехнических целей: медь высшей марки M00к должна иметь удельное сопротивление не выше $1,7241 \cdot 10^{-8}$ Ом·м при 20°C. Отклонение от этого

стандарта — сигнал о наличии примесей. Тот же принцип используется при контроле полупроводниковых пластин кремния: удельное сопротивление кремния меняется на порядки в зависимости от концентрации легирующих примесей, и измерение сопротивления — стандартная операция в производстве микросхем.

Сеть как организм

Оглядываясь на всё сказанное в этой главе, начинаешь понимать: закон Ома — это не просто формула из учебника. Это универсальный язык, на котором описываются потоки заряда в любых системах — от нанометровых транзисторов до тысячекилометровых геологических структур, от миллиамперных сигналов ЭКГ до килоамперных разрядов дефибриллятора.

Георг Симон Ом не мог представить себе ни транзистора, ни МРТ, ни геофизического зондирования. Он работал с медными проволоками и термопарой на деревянном столе в кёльнской гимназии. Но универсальность его закона оказалась настолько велика, что он вошёл в совершенно новые области знания — не потому, что кто-то намеренно его туда внедрял, а потому что природа устроена именно так.

В следующей главе мы отправимся туда, где закон Ома встречает своих самых экзотических соседей: квантовые проводники размером

в несколько атомов, графен и топологические изоляторы — материалы, которые переписывают наши представления о том, что такое сопротивление.

Глава 9. На пределах применимости

Где заканчивается привычный мир

Есть особое удовольствие в том, чтобы довести закон до его границ. Это похоже на путешествие к краю карты — туда, где привычные ориентиры исчезают и начинается *terra incognita*. Именно на границах применимости физических законов рождаются новые открытия, новые технологии и новые вопросы, которые двигают науку вперёд.

Для закона Ома такая граница наступает там, где размеры проводника сжимаются до нанометров, где квантовая механика перестаёт быть поправкой и становится главным действующим лицом, где электрон уже нельзя считать классической частицей, летящей сквозь решётку. Здесь начинается мир, который Ом не мог вообразить, — но именно его закон указывает нам дорогу к этому миру, обозначая точку, где классика уступает квантовой физике.

Нанопроводники: когда размер меняет всё

Представьте, что мы берём медный провод и начинаем его утончать. Миллиметр, микрон, сотня нанометров, десяток нанометров —

на каждом этапе закон Ома работает исправно. Но когда диаметр провода достигает нескольких нанометров — единиц или десятков атомных размеров — происходит нечто неожиданное.

В обычном проводнике электрон движется в трёхмерном пространстве и сталкивается с решёткой во всех направлениях — это и создаёт сопротивление. Но когда проводник становится настолько тонким, что его поперечный размер сравнивается с длиной волны де Бройля электрона (несколько нанометров для металлов), движение электрона поперёк проводника оказывается **квантово запрещённым** в большинстве направлений. Электрон как бы «не замечает», что проводник узкий — он просто не может занять большинство поперечных квантовых состояний.

Следствие поразительно: сопротивление такого нанопроводника определяется не классической формулой $R = \rho l/S$, а принципиально иным законом. В 1988 году немецкий физик Рольф Ландауэр сформулировал то, что сегодня называют **формулой Ландауэра**:

$$G = \frac{2e^2}{h} \cdot M \cdot T$$

где G — проводимость (величина, обратная сопротивлению), e — заряд электрона, h — постоянная Планка, M — число открытых квантовых каналов проводимости, T — вероятность прохождения электрона через канал.

Обратите внимание на структуру формулы. Комбинация $2e^2/h$ — это **квант проводимости**, фундаментальная физическая константа, равная примерно $7,75 \cdot 10^{-5}$ См. Её обратная величина — **квант сопротивления**:

$$R_0 = \frac{h}{2e^2} \approx 12\,906 \text{ Ом}$$

Это минимально возможное сопротивление одного квантового канала проводимости. Оно не зависит ни от материала, ни от длины проводника, ни от температуры. Это универсальная константа природы — такая же фундаментальная, как скорость света или заряд электрона.

Экспериментально квантовую проводимость наблюдали в 1988 году Ван Вейс и Хойкен в Нидерландах: они создали крошечный канал в двумерном электронном газе и наблюдали, как проводимость нарастает ступенями — ровно по одному кванту $2e^2/h$ при каждом открытии нового квантового канала. Ступенчатый график проводимости стал одним из самых красивых экспериментальных результатов физики конденсированного состояния.

Графен: двумерный революционер

В 2004 году в Манчестерском университете Андрей Гейм и Константин Новосёлов получили то, что долгое время считалось теоретически невозможным: отдельный атомный слой углерода — **графен**. За

это открытие в 2010 году они получили Нобелевскую премию по физике.

Графен — это буквально двумерный материал: один атом толщиной, атомы углерода расположены в виде правильных шестиугольников, напоминающих пчелиные соты. Казалось бы, что особенного? Но электронные свойства графена настолько необычны, что он заслуживает отдельного разговора.

В обычном металле электроны вблизи уровня Ферми ведут себя как нерелятивистские частицы с эффективной массой — они подчиняются уравнению Шрёдингера. В графене всё иначе. Электроны в нём движутся так, как будто они **безмассовые** — их поведение описывается не уравнением Шрёдингера, а уравнением Дирака, предназначенным для релятивистских частиц. Скорость электронов в графене составляет около 10^6 м/с — примерно 1/300 скорости света. Это в сто раз больше скорости дрейфа электронов в меди.

Что это означает для закона Ома? В чистом идеальном графене при абсолютном нуле температур закон Ома нарушается фундаментальным образом: в точке нейтральности (точке Дирака) проводимость не обращается в нуль, как в обычном проводнике, а принимает минимальное значение, равное всё тому же кванту проводимости $4e^2/h$ (множитель 4 учитывает спиновое и долинное вырождение в

графене). Проводимость имеет нижний предел, установленный квантовой механикой.

Практически графен обладает рядом рекордных характеристик. Подвижность носителей заряда в графене при комнатной температуре — более $200\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что в 140 раз превышает подвижность в кремнии. Графен выдерживает плотность тока до 10^8 А/см^2 — в сто раз больше, чем медь. При этом он прозрачен (поглощает лишь 2,3% видимого света), гибок и прочнее стали.

Всё это делает графен кандидатом на роль материала следующего поколения электроники — замены кремнию в транзисторах, меди в межсоединениях, индия в прозрачных электродах. Но путь от лабораторных образцов до массового производства оказался значительно труднее, чем казалось в эйфории первых лет после открытия. Получение бездефектного графена большой площади, управление его свойствами, создание на его основе транзисторов с хорошим отношением токов включения и выключения — всё это открытые инженерные проблемы, над которыми работают тысячи исследователей по всему миру.

Топологические изоляторы: ток по краям

Если графен — революция в двумерных проводниках, то **топологические изоляторы** — революция в нашем понимании самой природы проводимости.

Топологический изолятор — это материал, который внутри является изолятором (его запрещённая зона не позволяет электронам проводить ток через объём), но на своей поверхности — или на границе с другим материалом — обязан проводить ток. Это «обязан» — ключевое слово: поверхностная проводимость в топологическом изоляторе защищена топологией электронной структуры и не может быть уничтожена никакими примесями, дефектами или деформациями, если они не разрушают саму топологическую природу материала.

Слово «топология» здесь употребляется в строгом математическом смысле. Электронная структура топологического изолятора характеризуется топологическим инвариантом — целым числом, которое не меняется при непрерывных деформациях системы, точно так же, как число дырок в поверхности не меняется при её непрерывном растяжении и сжатии (бублик с одной дыркой нельзя превратить в сферу без разрывов). Этот инвариант гарантирует существование поверхностных проводящих состояний.

Что особенно замечательно: поверхностные электроны в топологическом изоляторе движутся так, что их спин жёстко связан с направлением движения — спин «вверх» движется вправо, спин «вниз» — влево. Это означает, что обратное рассеяние (когда электрон отражается назад от препятствия) **запрещено**: чтобы отразиться, электрон должен был бы перевернуть свой спин, а это требует нарушения сим-

метрии обращения времени. В результате поверхностный ток в топологическом изоляторе течёт без рассеяния — как в сверхпроводнике, но при комнатной температуре и без всякого охлаждения.

Первые топологические изоляторы — висмут-сурьмяные сплавы — были предсказаны теоретически в 2007 году Фу и Кейном и вскоре обнаружены экспериментально. Сегодня известны десятки топологических изоляторов: теллурид висмута Bi_2Te_3 , селенид висмута Bi_2Se_3 , теллурид сурьмы Sb_2Te_3 . Их поверхностные состояния наблюдаются методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) — экспериментальная картина настолько красива, что физики называют её «конусом Дирака» и вешают соответствующие изображения на стены лабораторий.

Практические приложения топологических изоляторов пока в основном теоретические — но перспективы захватывают дух. Топологические кубиты на основе так называемых **майорановских фермионов**, которые могут существовать на границах топологических сверхпроводников, рассматриваются как основа для отказоустойчивого квантового компьютера. Microsoft активно инвестирует в это направление. Если теория верна — а эксперименты дают всё более убедительные подтверждения — то топологические материалы станут основой следующего поколения вычислительных технологий.

Квантовый эффект Холла: сопротивление с точностью атомных стандартов

Говоря о пределах применимости закона Ома, нельзя не упомянуть одно из самых удивительных явлений в физике твёрдого тела — **квантовый эффект Холла**, открытый Клаусом фон Клицингом в 1980 году (Нобелевская премия 1985 года).

При очень низких температурах и сильных магнитных полях двумерный электронный газ в полупроводниковых структурах проявляет поразительное свойство: его поперечное (холловское) сопротивление принимает строго дискретные значения:

$$R_H = \frac{h}{e^2 \cdot n} = \frac{25\,812,807}{n}$$

где n — целое число. Это сопротивление не зависит ни от размеров образца, ни от материала, ни от концентрации носителей, ни от температуры (в разумных пределах). Оно определяется исключительно фундаментальными константами — постоянной Планка и зарядом электрона.

Это настолько точно и воспроизводимо, что с 1990 года квантовый эффект Холла используется как **международный эталон сопротивления**. Один «клицинг» — единица сопротивления, равная 25812,807 Ом, — воспроизводится в лабораториях любой страны мира

с относительной погрешностью лучше 10^{-9} . Это точнее, чем любой физический артефакт, который человечество когда-либо создавало.

Закон Ома как компас в неизведанном

Оглядываясь на путь, пройденный в этой главе, можно заметить удивительную вещь. Квантовая проводимость, графен, топологические изоляторы, квантовый эффект Холла — все эти явления описываются не законом Ома, а значительно более сложными квантовомеханическими теориями. И тем не менее закон Ома незримо присутствует в каждом из этих контекстов — как точка отсчёта, как граница, от которой отсчитываются отклонения, как язык, на котором формулируется вопрос «а что здесь происходит нестандартного?».

Физик, исследующий квантовый нанопроводник, первым делом спрашивает: следует ли его сопротивление закону Ома? Если нет — в чём именно отклонение? На сколько квантов проводимости? Это и есть научный метод в действии: сначала проверяем простейшую модель, затем систематически изучаем её нарушения.

В этом смысле закон Ома — не просто утверждение о свойствах металлических проводников. Это **эталон нормы**, относительно которого физика квантового транспорта определяет себя. Кёльнский учитель, сам того не зная, создал систему координат для физики, которая родилась через сто лет после его смерти.

Глава 10. Методология одного открытия

Наука как ремесло

Когда мы читаем об открытиях в популярных книгах, они нередко предстают как озарения — мгновенные вспышки гениальности, ниспосланные свыше. Ньютону упало яблоко. Архимеду пришла идея в ванне. Кекуле приснился змей, кусающий свой хвост. Эти истории красивы — и почти всегда неполны. За каждым «озарением» стоят годы методической работы, неудачных экспериментов, переосмысления данных и постепенного нащупывания верного пути.

История открытия закона Ома — образцовый пример того, как в действительности делается наука. Здесь нет ни счастливой случайности, ни мистического прозрения. Есть нечто значительно более захватывающее: сознательное применение научного метода человеком, который понимал, что делает, и делал это лучше всех своих современников.

Гипотетико-дедуктивный метод: от идеи к формуле

Философы науки давно выделили особый способ познания, который отличает зрелую науку от простого накопления фактов. Он называется **гипотетико-дедуктивным методом** и работает следующим образом.

Сначала учёный формулирует **гипотезу** — предположение о том, как устроена изучаемая система. Гипотеза не обязана быть очевидной или «выведенной» из данных — она может быть смелым допущением, аналогией, интуитивным прыжком. Затем из гипотезы **дедуктивно выводятся** конкретные предсказания: если гипотеза верна, то в таком-то эксперименте мы должны наблюдать то-то и то-то. Наконец, предсказания **проверяются экспериментом**. Если эксперимент подтверждает предсказание — гипотеза получает поддержку. Если опровергает — гипотеза отвергается или модифицируется.

Карл Поппер, великий философ науки XX века, добавил к этой схеме принципиальный элемент: научная гипотеза должна быть **фальсифицируемой** — то есть принципиально опровержимой экспериментом. Утверждение, которое нельзя проверить никаким опытом, не является научным, сколь бы красивым оно ни казалось.

Посмотрим, как Ом прошёл через все эти этапы.

Этап первый: наблюдение и аналогия

К 1825 году Ом знал, что ток в гальванической цепи зависит от длины проводника и от свойств источника. Это было известно и до него — качественно. Но никто не мог сказать точно: как именно зависит? Прямо пропорционально длине? По квадратному закону? По логарифму?

Прочитав Фурье, Ом сформулировал гипотезу: электрический ток аналогичен тепловому потоку, и зависимость тока от «движущей силы» и длины проводника должна быть линейной — такой же, как зависимость теплового потока от разности температур и длины теплопроводящего стержня.

Это была именно гипотеза — не факт, не наблюдение, а предположение, основанное на аналогии. Аналогия не доказывает — она лишь подсказывает направление поиска. Ом это прекрасно понимал.

Этап второй: операционализация

Прежде чем проверять гипотезу, нужно сделать нечто менее заметное, но не менее важное: **операционализовать** понятия — то есть дать каждой теоретической величине точное экспериментальное определение, объяснить, как именно её измерять.

Что такое «движущая сила» тока? Ом принял за неё ЭДС термопары — разность температур её спаев, умноженную на термоэлектрический коэффициент. Что такое «сопротивление»? Это характеристика проводника, которую можно изменять, меняя его длину, толщину или материал. Что такое «ток»? Это угол отклонения стрелки гальванометра — пропорциональный, по устройству прибора, силе тока.

Каждое из этих операциональных определений можно оспорить и уточнить — и впоследствии они были уточнены. Но в момент создания они были достаточно строгими, чтобы сделать эксперимент воспроизводимым и количественным.

Этап третий: эксперимент как диалог с природой

Ом поставил серию экспериментов, каждый из которых менял ровно одну переменную при фиксированных остальных. Это принцип **контролируемого эксперимента** — один из краеугольных камней научного метода, сформулированный ещё Бэконом, но далеко не всеми соблюдавшийся на практике.

Он менял длину проводника — и измерял ток. Менял материал — измерял. Менял толщину — измерял. При каждом измерении источник тока оставался неизменным (термопара с фиксированной разностью температур). Гальванометр был откалиброван и стабилен.

Результаты складывались в таблицы. Таблицы — в графики. Графики оказывались прямыми линиями.

Прямая линия на графике зависимости тока от «движущей силы» при постоянном сопротивлении — это и есть экспериментальное подтверждение гипотезы о линейности. Прямая линия на графике зависимости тока от обратной величины длины проводника — подтверждение того, что сопротивление пропорционально длине.

Совокупность этих прямых линий и составила закон Ома — не как умозрительную конструкцию, а как эмпирически установленный факт.

Этап четвёртый: математизация

Но Ом пошёл дальше простой констатации «ток пропорционален напряжению». Он записал закон в виде математической формулы — и это был шаг, который отделил его работу от большинства современных ему исследований по электричеству.

В первоначальной записи Ома формула выглядела так:

$$X = \frac{a \cdot A}{b + L}$$

где X — ток, A — «возбуждающая сила», L — длина проводника, a и b — константы, характеризующие контакты и внутреннее сопротивление. В современных обозначениях это в точности закон Ома для полной цепи. Форма записи изменилась — физический смысл остался.

Математизация принципиально важна по двум причинам. Во-первых, она делает предсказания точными и проверяемыми: можно вычислить конкретное число и сравнить его с результатом измерения. Во-вторых, она позволяет обобщать: математическая структура закона подсказывает, как он может выглядеть в более сложных ситуациях — для полной цепи, для параллельного и последовательного соединения проводников, для переменного тока.

Почему простые законы труднее всего доказать

Здесь мы подходим к одному из самых парадоксальных аспектов истории науки. Казалось бы, чем проще закон — тем легче его обнаружить. На самом деле всё ровно наоборот.

Сложный закон, описывающий необычное явление, требует сложного эксперимента — но хотя бы ясно, что именно измерять. Простой закон, описывающий повседневное явление, требует победить **предвзятость наблюдателя**: исследователь уже «знает», что должно получиться, и неосознанно интерпретирует данные в пользу своих ожиданий.

Ещё важнее другое. Простой линейный закон маскируется шумом. Если истинная зависимость нелинейна — это бросается в глаза даже при грубых измерениях. Но если зависимость линейна — любое случайное отклонение может создать видимость нелинейности. Чтобы установить именно линейность, нужны измерения высокой точности в широком диапазоне параметров. Именно этого не хватало предшественникам Ома — и именно это он обеспечил, создав стабильный источник тока и точный гальванометр.

Есть и ещё одна ловушка: **концептуальная неготовность**. Закон Ома предполагает, что сопротивление — это объективная, измеримая характеристика проводника, не зависящая от тока и напряжения. Для

1820-х годов это было неочевидно. Многие физики предполагали, что «проводимость» металла зависит от силы тока — по аналогии с тем, как скорость течения воды зависит от давления в трубе с переменным сечением. Чтобы установить линейность и постоянство сопротивления, нужно было сначала допустить самую возможность такой простоты.

Роль ошибки и самокоррекции

Ом не был непогрешим. В первых своих работах 1825–1826 годов он использовал батарею Вольта и получал результаты с существенными систематическими погрешностями — именно из-за нестабильности источника тока. Эти ранние результаты частично противоречили закону, который он же впоследствии сформулировал.

Это важный момент. Ом не скрыл ранние данные и не объявил их окончательными. Он понял источник ошибки, нашёл способ её устранить — заменил батарею термопарой — и повторил измерения. Полученные результаты были существенно точнее и хорошо согласовывались с линейным законом.

Самокоррекция — один из главных механизмов, отличающих науку от догмы. Учёный вправе ошибаться. Он не вправе игнорировать свидетельства собственных ошибок. Ом прошёл через этот процесс образцово — и именно поэтому его окончательные результаты

оказались настолько надёжными, что выдержали полтора века проверок.

Контекст и индивидуальность открытия

Философы и историки науки давно спорят о том, в какой мере научные открытия predetermined исторически — и в какой мере они зависят от индивидуальности учёного.

С одной стороны, закон Ома, по всей видимости, был бы открыт и без Ома — примерно в то же время. Инструменты для его открытия — термopapa, гальванометр, математическая физика Фурье — существовали. Потребность в количественной теории электрических цепей ощущалась. Кто-нибудь рано или поздно собрал бы всё это вместе.

С другой стороны, именно Ом сделал это первым и лучше всех. Именно его методическая точность, его навыки экспериментатора, его математическая культура и его настойчивость в поиске стабильного источника тока дали результат, который не оставлял сомнений. Другие исследователи того же времени — Барлоу, Беккерель, Дэви — работали с электрическими цепями, но никто из них не получил того, что получил Ом.

В этом и состоит главный урок методологии открытия Ома: **индивидуальное мастерство решает**. Наука — коллективный процесс в историческом масштабе, но в каждый конкретный момент она делается конкретным человеком с конкретными навыками и конкретным

способом думать. Ом принёс в физику культуру точного ремесла — и это изменило всё.

Наблюдение, гипотеза, эксперимент, теория

Подведём итог четырёх этапов, через которые прошёл Ом, и которые образуют универсальную схему научного открытия.

Наблюдение — качественная констатация зависимости тока от свойств проводника и источника. Это знали до Ома.

Гипотеза — предположение о линейности этой зависимости, вдохновлённое аналогией с теплопроводностью Фурье. Это был вклад Ома-теоретика.

Эксперимент — серия контролируемых измерений с термопарой и гальванометром, дающая количественные данные с высокой точностью. Это был вклад Ома-экспериментатора.

Теория — математическая формулировка закона, позволяющая делать точные предсказания и обобщать результаты на новые ситуации. Это был вклад Ома-математика.

Примечательно, что один человек совместил в себе все четыре роли. Сегодня наука специализировалась настолько, что экспериментатор и теоретик — нередко разные люди, а порой и представители

разных поколений. Но в эпоху Ома наука ещё допускала такое единство — и его история напоминает нам, как много может сделать один человек, вооружённый ясным методом и неотступным упорством.

Глава 11. Закон Ома и другие великие законы

Одна математика — разная природа

Есть в физике явление, которое философы науки называют **структурным единством природы**, а физики — просто красотой уравнений. Суть его в следующем: совершенно разные физические процессы — передача тепла, диффузия вещества, течение электрического тока, фильтрация жидкости через пористую среду — описываются математически одинаковыми уравнениями. Природа, по всей видимости, не слишком богата математическими идеями — зато использует каждую из них сполна, повторяя одну и ту же структуру в самых разных контекстах.

Закон Ома — один из ярчайших примеров этого единства. Рядом с ним стоят закон Фурье для теплопроводности и закон Фика для диффузии. Все три — представители одного математического семейства. Познакомимся с каждым из них — и поймём, почему это не случайное совпадение, а глубокое свойство мироздания.

Закон Фурье: тепло течёт вниз по горке

Жозеф Фурье опубликовал свою «Аналитическую теорию тепла» в 1822 году — за пять лет до выхода книги Ома. Именно эта работа, как мы помним из второй главы, вдохновила Ома на математизацию электричества. Но каков сам закон Фурье?

Фурье установил: количество тепла, протекающего через единицу площади проводящего тела в единицу времени, пропорционально **градиенту температуры** — то есть скорости изменения температуры в пространстве:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

где q — плотность теплового потока (Вт/м²), λ — коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·К)), $\Delta T/\Delta x$ — градиент температуры (К/м). Знак минус означает, что тепло течёт от горячего к холодному — в сторону убывания температуры.

Сравним со структурой закона Ома в форме, удобной для сравнения. Плотность тока j (А/м²) связана с напряжённостью электрического поля E (В/м) соотношением:

$$j = \sigma \cdot E = \sigma \cdot \frac{\Delta U}{\Delta x}$$

где σ — удельная электрическая проводимость (См/м). Это закон Ома в дифференциальной форме — наиболее общая его запись, справедливая для любой точки проводника.

Структура идентична до символа. Поток (тепловой или электрический) пропорционален градиенту (температуры или потенциала) с коэффициентом пропорциональности, характеризующим свойство среды (теплопроводность или электропроводность). Математика одна — физика разная.

Закон Фика: вещество растекается само

В 1855 году немецкий физиолог Адольф Фик изучал диффузию — самопроизвольное перемешивание веществ вследствие теплового движения молекул. Он установил закон, который сегодня носит его имя:

$$J = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

где J — плотность потока вещества (моль/(м²·с)), D — коэффициент диффузии (м²/с), $\Delta c/\Delta x$ — градиент концентрации (моль/м⁴). Словус: вещество диффундирует от высокой концентрации к низкой.

Знак минус показывает, что вещество диффундирует из области с высокой концентрацией в область с низкой. Этот закон стал одним из фундаментальных законов физической химии и биофизики, а сегодня применяется при описании переноса веществ в растворах, газах, биологических тканях и мембранах.

Три закона рядом:

Явление	Поток	Движущая сила	Коэффициент
Электропроводность (Ом)	Плотность тока j	Градиент потенциала $\Delta U/\Delta x$	Проводимость σ
Теплопроводность (Фурье)	Тепловой поток q	Градиент температуры $\Delta T/\Delta x$	Теплопроводность λ
Диффузия (Фик)	Поток вещества J	Градиент концентрации $\Delta c/\Delta x$	Коэффициент диффузии D

Три строки — одна математическая идея. Поток пропорционален градиенту соответствующей интенсивной величины. Коэффициент пропорциональности характеризует способность среды проводить этот поток.

Закон Дарси: вода сквозь камень

Список не исчерпывается тремя законами. В 1856 году французский инженер Анри Дарси изучал фильтрацию воды через слои песка и установил: скорость фильтрации пропорциональна градиенту давления:

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

где v — скорость фильтрации, k — проницаемость пористой среды, μ — вязкость жидкости, $\Delta P/\Delta x$ — градиент давления. Та же математическая структура — теперь для течения жидкости сквозь пористую среду.

Закон Дарси критически важен для нефтяной геологии: именно он описывает, как нефть движется сквозь породу к скважине, и именно на нём основаны модели нефтяных пластов. Буровики и нефтяники, вероятно, никогда не думали о себе как о последователях Ома — но математически они решают ту же задачу.

Почему одна математика?

Это совпадение — случайность или закономерность? Физики давно дали ответ: закономерность, и причина глубока.

Все перечисленные законы описывают **нелокальные транспортные процессы** — перенос чего-либо (заряда, тепла, вещества, жидкости) через среду под действием некоторой «движущей силы». В каждом случае система стремится к равновесию: электрические потенциалы выравниваются, температуры уравниваются, концентрации выравниваются, давления выравниваются. Движение к равновесию всегда происходит вниз по градиенту соответствующей величины.

Математически это означает, что все эти процессы описываются одним и тем же типом уравнений — **параболическими уравнениями в частных производных** вида:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 \phi$$

где ϕ — соответствующая величина (потенциал, температура, концентрация), D — соответствующий коэффициент переноса, ∇^2 — оператор Лапласа. Это уравнение диффузии в самом общем смысле — универсальное уравнение релаксации к равновесию.

Именно поэтому математик, знающий решения уравнения теплопроводности, автоматически знает решения уравнений диффузии и электростатики. Именно поэтому метод, разработанный Фурье для анализа тепловых процессов, оказался применим к электрическим цепям. И именно поэтому Ом — прочитав Фурье — смог немедленно увидеть структуру своего закона.

Аналогия как инструмент открытия

История связи между законом Ома и законом Фурье — прекрасная иллюстрация того, как аналогии работают в науке. Аналогия — это не украшение речи и не педагогический приём. Это инструмент открытия, позволяющий переносить математический аппарат из одной области в другую.

Максвелл, создавая свою теорию электромагнитного поля, намеренно использовал гидродинамические аналогии — представлял силовые линии поля как трубки тока жидкости. Это помогало ему угадывать правильную математическую структуру уравнений задолго до

того, как он мог вывести их строго. Кельвин применял аналогию между электростатикой и теорией упругости. Фарадей мыслил силовыми линиями — совершенно механистическими образами, которые тем не менее навели его на правильные **Единство природы: философский взгляд**

За математическим единством законов переноса стоит более глубокий вопрос: почему природа вообще устроена так просто и единообразно? Почему один математический аппарат описывает столь разные явления?

Один ответ — прагматический: мы называем «законами природы» именно те соотношения, которые оказались простыми и воспроизводимыми. Сложные, непредсказуемые явления мы не называем законами — мы называем их хаосом, случайностью, сложной системой. В этом смысле простота законов природы — отчасти наш выбор: мы ищем простое и находим его.

Другой ответ — более глубокий — восходит к принципам симметрии. Нётер доказала в 1915 году: каждая непрерывная симметрия физической системы порождает закон сохранения. Законы сохранения, в свою очередь, порождают уравнения непрерывности, а уравнения непрерывности в сочетании с линейностью материальных соотношений дают именно ту математическую структуру, которую мы видим в законах Ома, Фурье и Фика.

Иными словами: простота этих законов — следствие фундаментальных симметрий природы. Природа симметрична, и поэтому её законы просты. Ом, сам того не зная, прикоснулся к этой симметрии в своей кёльнской лаборатории.

Пределы аналогии

Однако аналогии, как и законы, имеют границы. Законы Ома, Фурье и Фика линейны — и это их общая черта, но и общее ограничение. При достаточно больших потоках все три закона нарушаются.

При очень больших токах металл плавится — и его теплопроводность меняется скачком. При очень больших градиентах температуры нелинейные эффекты в теплопроводности становятся заметными. При высоких концентрациях диффузия описывается уже не законом Фика, а более сложными уравнениями, учитывающими взаимодействие частиц.

Эта общая нелинейность за пределами применимости — ещё одно проявление единства природы: все три закона нарушаются похожим образом и по похожим причинам. Нелинейность — универсальный симптом того, что система вышла из режима малых отклонений от равновесия.

Великие законы как семья

Подводя итог, можно сказать: закон Ома принадлежит к великому семейству линейных законов переноса, описывающих движение природы к равновесию. Фурье, Фик, Дарси, Ом — это братья, рождённые в разных лабораториях, говорящие на разных физических языках, но несущие в себе одну математическую ДНК.

Это семейство — не исторический курьёз и не педагогическое удобство. Это свидетельство глубокого порядка, скрытого за многообразием природных явлений. Физик, понявший закон Ома по-настоящему — не как рецепт для вычислений, а как выражение структуры реальности — оказывается на пороге понимания всей физики транспортных явлений. За этим порогом — теория поля, статистическая физика, термодинамика необратимых процессов и в конечном счёте — современная физика конденсированного состояния.

Всё это началось с термопары, гальванометра и деревянного стола в Кёльне.

Эпилог: Три буквы — бесконечный мир

Конец путешествия — и его начало

Мы прошли долгий путь. Из Эрлангена конца XVIII века — через кёльнскую лабораторию, через насмешки немецких профессоров и запоздалое признание Лондонского королевского общества — к квантовым нанопроводникам, графену и топологическим изоляторам. От деревянного стола с термопарой — к процессорам с сотнями миллиардов транзисторов, к дефибрилляторам в руках реаниматологов, к геофизическим зондам, просвечивающим земную кору.

Всё это — $I = U/R$.

Три буквы, одна дробь. И за ней — бесконечный мир.

Закон Ома как точка входа

Физика — наука, которую принято считать сложной. И она действительно сложна — на своих вершинах. Квантовая хромодинамика, общая теория относительности, теория струн требуют математической подготовки, которой большинство людей никогда не достигнет, и это нормально. Но у физики есть нечто удивительное: в неё можно войти с любого уровня — и каждый уровень по-своему полон и самодостаточен.

Закон Ома — один из лучших входов. Он прост в формулировке, но богат следствиями. Он понятен интуитивно — через аналогию с водопроводом — но допускает строгое математическое развитие. Он работает в бытовой электрике — но выводит к квантовой физике. Он принадлежит XIX веку — но остаётся актуальным в XXI-м.

Именно поэтому его преподают в школе первым из законов электричества. Не потому что он самый простой — хотя он и прост. А потому что он самый глубокий из простых. Потому что, по-настоящему поняв его, вы понимаете структуру целого класса физических явлений — и получаете ключ к значительно более обширным территориям науки.

Что стоит за формулой

Перечитаем то, что мы узнали — не как список фактов, а как единую историю.

Закон Ома — это история человека, который принёс в физику культуру точного ремесла. Сын слесаря, умевший работать руками так же хорошо, как головой, Ом соединил два мира — мир математики и мир экспериментального измерения — в момент, когда большинство его коллег выбирали один из них.

Это история научного метода в действии. Гипотеза, вдохновлённая аналогией. Контролируемый эксперимент, победивший систематическую ошибку. Математическая формулировка, превратившая

наблюдение в закон. Проверка и самокоррекция. Всё это — не учебная схема, а живой процесс, который Ом прошёл в одиночку, в скромной лаборатории, без финансирования и без поддержки.

Это история физики как зеркала природы. Закон Ома оказался частью семейства линейных законов переноса — Фурье, Фик, Дарси — которые описывают фундаментальное свойство мира: его стремление к равновесию. За этим стремлением стоят симметрии пространства-времени и принципы термодинамики. Простая формула отражает глубокий порядок.

И наконец, это история о том, как знание не стареет. Формуле почти двести лет — а она по-прежнему работает в каждом устройстве, которое вы держите в руках.

Приглашение к дальнейшему путешествию

Если эта книга разожгла любопытство — а мы искренне на это надеемся — то закон Ома является лишь первым шагом по карте, которая простирается во все стороны.

На север — **электродинамика и уравнения Максвелла**. Они объединяют электричество и магнетизм в единую теорию и предсказывают существование электромагнитных волн — включая свет. Это одна из величайших теорий в истории физики, и закон Ома является её частным случаем в квазистатическом пределе.

На восток — **физика конденсированного состояния**. Зонная теория металлов и полупроводников, теория сверхпроводимости БКШ, квантовый эффект Холла, топологические фазы — всё это рождается из вопроса «почему вещество проводит ток именно так?». Закон Ома — стартовая точка этого пути.

На юг — **электронные схемы и микроэлектроника**. Транзисторы, операционные усилители, цифровые логические схемы, микропроцессоры — всё это построено на законе Ома и законах Кирхгофа. Понять, как работает ваш смартфон изнутри — захватывающее путешествие, начинающееся именно здесь.

На запад — **философия и история науки**. Как рождаются законы природы? Что значит «объяснить» физическое явление? Как соотносятся теория и эксперимент? История Ома — один из самых поучительных кейсов в этой дисциплине, исследованный в деталях и богатый уроками для всех, кто думает о природе научного познания.

Последнее слово

Георг Симон Ом умер в 1854 году в Мюнхене — наконец признанным, наконец профессором, наконец окружённым уважением, которого он заслуживал с молодости. На его надгробии нет формулы. Но она живёт везде — в проводах в стенах вашего дома, в чипе вашего

телефона, в кабелях на дне океана, соединяющих континенты, в датчиках марсохода, ползущего по красной пустыне за сотни миллионов километров от Земли.

Три буквы. Бесконечный мир.

$$I = \frac{U}{R}$$

Приложения

Приложение 1. Краткая хронология: от Гальвани до квантовой проводимости

Год	Событие
1780	Луиджи Гальвани обнаруживает сокращение мышц лягушки под действием электричества — рождение биоэлектричества
1800	Алессандро Вольта создаёт первый химический источник тока — вольтов столб
1820	Ганс Христиан Эрстед открывает связь электрического тока и магнитного поля
1820	Андре-Мари Ампер формулирует законы взаимодействия токов — основа электродинамики
1821	Томас Зеебек открывает термоэлектрический эффект — Ом использует его для создания стабильного источника тока
1822	Жозеф Фурье публикует «Аналитическую теорию тепла» — вдохновение для Ома
1826	Ом публикует первые статьи с результатами экспериментов по электрическим цепям

1827	Выход книги «Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet» — рождение закона Ома
1831	Майкл Фарадей открывает электромагнитную индукцию
1841	Ом получает медаль Копли Лондонского королевского общества
1845	Густав Кирхгофф формулирует законы разветвлённых электрических цепей
1855	Адольф Фик публикует закон диффузии — математическая аналогия закона Ома
1861– 1865	Джеймс Клерк Максвелл создаёт теорию электромагнитного поля
1873	Максвелл записывает закон Ома в дифференциальной форме: $j = \sigma E$
1881	Международный конгресс электриков в Париже утверждает единицы ом, ампер, вольт
1897	Дж. Дж. Томсон открывает электрон — носитель тока в металлах
1900	Пауль Друде создаёт классическую электронную теорию металлов, объясняющую закон Ома

1911	Хейке Камерлинг-Оннес открывает сверхпроводимость — ртуть с нулевым сопротивлением при 4,15 К
1928	Феликс Блох разрабатывает квантовую теорию электронов в кристаллах — зонная теория
1957	Бардин, Купер и Шриффер публикуют теорию БКШ сверхпроводимости
1980	Клаус фон Клицинг открывает квантовый эффект Холла — сопротивление как фундаментальная константа
1988	Ван Вейс и Хойкен наблюдают квантовую проводимость в нанопроводниках — рождение физики квантового транспорта
2004	Андрей Гейм и Константин Новосёлов получают графен — двумерный проводник XXI века
2007	Теоретическое предсказание топологических изоляторов (Фу и Кейн)
2010	Нобелевская премия по физике за графен
2019	Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в гидридах под давлением при 250 К

Приложение 2. Задачи для самопроверки с решениями

Задача 1. Через резистор течёт ток 2 А при напряжении 12 В. Найдите сопротивление резистора.

Решение:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{2} = 6 \text{ Ом}$$

Задача 2. Резистор сопротивлением 220 Ом подключён к источнику напряжения 22 В. Найдите силу тока и мощность, рассеиваемую на резисторе.

Решение:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{22}{220} = 0,1 \text{ А}$$

$$P = U \cdot I = 22 \cdot 0,1 = 2,2 \text{ Вт}$$

Задача 3. Аккумулятор с ЭДС 9 В и внутренним сопротивлением 1 Ом подключён к нагрузке 8 Ом. Найдите ток в цепи и напряжение на клеммах аккумулятора.

Решение:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{9}{8 + 1} = 1 \text{ А}$$

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r = 9 - 1 \cdot 1 = 8 \text{ В}$$

Задача 4. Два резистора 6 Ом и 3 Ом соединены параллельно и подключены к напряжению 12 В. Найдите общее сопротивление, общий ток и ток через каждый резистор.

Решение:

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} = \frac{3}{6} \Rightarrow R_{\text{общ}} = 2 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{общ}} = \frac{U}{R_{\text{общ}}} = \frac{12}{2} = 6 \text{ А}$$

$$I_1 = \frac{12}{6} = 2 \text{ А}, I_2 = \frac{12}{3} = 4 \text{ А}$$

Проверка: $I_1 + I_2 = 2 + 4 = 6 \text{ А} \checkmark$

Задача 5. Медный провод длиной 100 м и сечением 1,5 мм² подключён к напряжению 12 В. Удельное сопротивление меди $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Найдите сопротивление провода и ток.

Решение:

$$S = 1,5 \text{ мм}^2 = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{100}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 1,15 \text{ Ом}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{1,15} \approx 10,4 \text{ А}$$

Задача 6 (повышенной сложности). Дефибриллятор заряжает конденсатор ёмкостью 200 мкФ до напряжения 2500 В. Разряд происходит через сопротивление грудной клетки 50 Ом. Найдите начальный ток разряда и энергию, запасённую в конденсаторе.

Решение:

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{2500}{50} = 50 \text{ А}$$

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 2500^2}{2} = 625 \text{ Дж}$$

Приложение 3. Глоссарий: 20 ключевых терминов

Ампер (А) — единица силы тока СИ; ток, при котором через поперечное сечение проводника за 1 секунду проходит заряд 1 кулон.

Вольт (В) — единица электрического напряжения; разность потенциалов, при которой перемещение заряда 1 кулон совершает работу 1 джоуль.

Градиент — скорость изменения физической величины в пространстве; в законах переноса градиент является движущей силой потока.

Дрейфовая скорость — средняя скорость направленного движения электронов вдоль проводника под действием электрического поля; порядка долей миллиметра в секунду.

ЭДС (электродвижущая сила) — максимальное напряжение источника тока при отсутствии нагрузки; измеряется в вольтах.

Закон Ома — фундаментальный закон электрических цепей: сила тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

Импеданс (Z) — обобщение сопротивления для цепей переменного тока; комплексная величина, включающая активное и реактивное сопротивления.

Квант проводимости — минимальная единица проводимости в квантовых системах, равная $2e^2/h \approx 7,75 \cdot 10^{-5}$ См.

Кулон — единица электрического заряда; заряд, переносимый током 1 А за 1 секунду.

Куперовская пара — связанное квантовомеханическое состояние двух электронов в сверхпроводнике; движется без рассеяния.

Ом (Ω) — единица электрического сопротивления; сопротивление, при котором напряжение 1 В вызывает ток 1 А.

Омический проводник — проводник, для которого сопротивление постоянно при любом напряжении и токе; график $I(U)$ — прямая линия.

Проводимость (G) — величина, обратная сопротивлению: $G = 1/R$; измеряется в сименсах (См).

Реактивное сопротивление — составляющая импеданса, обусловленная индуктивностью или ёмкостью цепи; не рассеивает мощность, а накапливает и возвращает энергию.

Сверхпроводимость — состояние вещества с нулевым электрическим сопротивлением, наступающее ниже критической температуры.

Сопротивление (R) — физическая характеристика проводника, определяющая его способность противодействовать электрическому току; зависит от материала, геометрии и температуры.

Термопара — устройство из двух разнородных металлов, генерирующее ЭДС пропорционально разности температур спаев; используется Омом как стабильный источник тока.

Топологический изолятор — материал, являющийся изолятором в объёме, но обязательно проводящий ток по поверхности благодаря топологической защите электронных состояний.

Удельное сопротивление (ρ) — характеристика материала, не зависящая от геометрии образца; измеряется в Ом·м.

Фаза тока — временной сдвиг между колебаниями тока и напряжения в цепи переменного тока; обусловлен реактивными элементами — индуктивностью и ёмкостью.

Приложение 4. Рекомендуемая литература и ресурсы

Классические научно-популярные книги

- **Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс** — «Фейнмановские лекции по физике», т. 3 (электричество и магнетизм). Непревзойдённое по глубине и живости изложение — от закона Ома до уравнений Максвелла.

- **Л. Д. Ландау, А. И. Китайгородский** — «Физика для всех», кн. 2 («Молекулы»). Советская классика научно-популярной литературы — строгая и при этом увлекательная.

- **Дж. Орир** — «Популярная физика». Ясное изложение основ электричества для тех, кто хочет большего, чем школьный учебник.

- **С. Хокинг** — «Краткая история времени». Не об электричестве — но о том, как физики думают о законах природы.

Для углублённого изучения

- **С. П. Мясников, Т. Н. Осанова** — «Пособие по физике». Подробное изложение закона Ома и теории электрических цепей с задачами.

- **Р. Ландауэр** — оригинальные статьи о квантовой проводимости (IBM Journal of Research and Development, 1957, 1970). Для тех, кто хочет из первых рук узнать о квантовом транспорте.

- **А. К. Гейм, К. С. Новосёлов** — «Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films» (Science, 2004). Статья об открытии графена — читается как детектив даже для неспециалиста.

Интернет-ресурсы

- **Khan Academy** (khanacademy.org) — бесплатные видеороки по закону Ома, цепям постоянного и переменного тока; доступно на русском языке.

- **PhET Interactive Simulations** (phet.colorado.edu) — интерактивные симуляторы электрических цепей от Университета Колорадо; позволяют «потрогать» закон Ома руками.

- **MIT OpenCourseWare** (ocw.mit.edu) — полные курсы лекций по физике и электронике от Массачусетского технологического института, в открытом доступе.

- **Школа для электрика** — практические статьи и гайды по электротехнике для начинающих и профессионалов; расчёты цепей, монтаж и диагностика.

Канал в Telegram: <https://t.me/electricalschool>