

Что происходит при контакте

Л.АШКИНАЗИ

Простой выключатель и сложная физика

Рассмотрение физики работы технических устройств хорошо тем, что можно увидеть связь разных физических законов и их практическое применение. Это облегчит изучение и запоминание физики, а также продемонстрирует ее практическое применение. Трудно научиться плавать, упражняясь на сухом месте, поэтому попробуем посмотреть, как в реальности применяются физические законы. При этом постараемся соблюдать четыре условия.

Первое условие. Устройства и ситуации, которые мы будем рассматривать, должны быть нам хотя бы в какой-то мере знакомы, мы их где-то или когда-то видели. Это, чтобы вам было спокойнее; в серьезной физике формально это не так – коэффициент вторичной эмиссии и поток электронов в вакууме никто не видел, но по мере их изучения, по мере погружения в проблему возникает нечто вроде «видения». А видел ли кто-то космические лучи? Видим ли мы фотоны? И вообще – что значит «видим»?

Второе условие. Физика, которой мы будем пользоваться, должна быть в основном школьная, превышения уровня должно быть немного, и этот момент будет выделен в тексте. Хотя было бы хорошо, чтобы вы сами умели отличать понятное от непонятого – это важно для обучения любому предмету, да и для жизни вообще.

Третье условие. При анализе работы любого устройства мы можем добраться до слишком сложного материала, и нам придется либо остановиться, либо принять какие-то утверждения автора на веру. Но и в этих случаях граница должна быть указана.

Четвертое условие. Самое забавное: мы можем добраться не только до сложного материала, но и до вещей, которые вообще по каким-то причинам слабо изучены. И не потому, что они спрятаны в глубинах звезд и элементарных частиц, иногда это «слабо изученное» мирно живет у вас в комнате. С некоторыми подобными вещами мы скоро встретимся.

Проблемы с поверхностью

Вы вошли в комнату и ткнули пальцем в выключатель. Вы знаете, что произошло – соединилась два кусочка металла и пошел ток. Или вот – вы нажали на клавишу на клавиатуре вашего компьютера и опять же замкнулся контакт. Правда, бывают емкостные клавиатуры, но мы их сейчас не обсуждаем. А возможны ситуации совсем других масштабов – где-то за городом на электростанции разошлись два контакта и с грохотом вспыхнула между ними многометровая электрическая дуга. Во всех трех случаях возник или разорвался контакт. Вот это мы и обсудим.

Прежде всего, во всех этих случаях начинали или прекращали соприкасаться две поверхности. Причем поверхности не в математическом смысле, а в физическом. Этих поверхностей две, и они могут быть устроены по-разному. Заметим, что вообще в физике наличие поверхности может сделать любую задачу существенно сложнее. Причина сложностей в том, что у поверхности больше параметров, чем у объема. Это вообще не очевидно – казалось бы, у поверхности параметров может быть и меньше, чем у объема. Например, плотность (или удельный вес) – этот параметр есть у объема, но его нет у поверхности. Расстояние между атомами – это есть и у него, и у нее. Дислокации – они есть у него и в некотором смысле (отклонения

структуры от идеальной) у нее, но не факт, что у нее их больше, скорее наоборот. Вес и масса есть у объема, но их вроде бы нет у поверхности. Так что победитель не очевиден.

Однако в физике под словом «поверхность» понимают не геометрическое понятие, а часть объема, как иногда говорят – «приповерхностную область». Это – слой, который принимает участие в процессах, происходящих на поверхности. Например, некая химическая реакция идет на поверхности. При этом она может быть и не связана с объемом, если это поверхность катализатора. Прилетели атомы A и B , прилипли, поползли по поверхности, наткнулись друг на друга, обрадовались, создали молекулу AB и улетели с поверхности (разумеется, вы примерно понимаете, каковы должны быть энергии связи A , B и AB с поверхностью, а также энергии связи A с B). Но ведь могло быть и иначе – прилетел атом A , прилип, поползал по поверхности, приполз из глубины материала C посредством диффузии атом примеси B , а дальше все, как в первом случае. Только разница в том, что теперь материал C , имеющий примесь B , будет терять эту примесь именно из приповерхностного слоя. Иными словами, в результате поверхностной реакции и процесса испарения состав материала вблизи поверхности изменяется, формируется так называемый приповерхностный слой, который в физике обычно называют «поверхностью».

Но так или иначе, а мы нажали на выключатель, две поверхности сближаются – и вот они соприкоснулись. Но как они это сделали? Контакт осуществляется не по всей площади соприкосновения. Исследовал ли кто-то контакт «атомно-гладких», т.е. идеальных на атомном уровне поверхностей? Сами такие поверхности исследованы довольно тщательно. На практике любая поверхность шероховата, две поверхности соприкасаются сначала по трем точкам, при этом механические напряжения вызывают деформацию контактирующих материалов: пластическую, если материал пластичен, и упругую – в любом случае. Контактные площадки расширя-

ются, но все равно площадь соприкосновения обычно остается намного меньше так называемой геометрической площади контакта, которая видна издали. Сделаем численную оценку.

Пусть геометрическая площадь контакта 10 мм^2 , а обуславливает его сила $F = 1\text{ Н}$ (вес гири массой 100 г). Если прочность материала $\sigma = 300\text{ Н/мм}^2$, то площадь истинного контакта будет $S = F/\sigma = 0,003\text{ мм}^2$, или $0,0003$ от геометрической площади контакта. (Кстати – вы никогда не задумывались над тем, почему нам удается поднимать со стола что-то плоское, например книгу? Ведь на нее сверху давит сила, равная произведению атмосферного давления 10 Н/см^2 на площадь, скажем, 300 см^2 . Даже перемножать страшно!)

Итак, при обычной силе прижатия контакт происходит по малой доле поверхности. Тут сразу возникает несколько вопросов.

Сопротивление и нагрев

Первый вопрос – куда при контакте девается оксидная пленка, которая образуется на воздухе на всех металлах (кроме золота, платины и, возможно, металлов ее группы). Толщина этой оксидной пленки составляет единицы и десятки нанометров, и она является изолятором, а туннелирование возможно при расстояниях на порядок меньших. Спасает то, что при контактировании эта пленка ломается, и ее куски оттесняются из области контакта.

Второй вопрос – размыкание контакта. Если материал контактных поверхностей одинаков, то на площадках истинного контакта может произойти «холодное сваривание» (а иногда и не холодное, это мы еще обсудим). В случае такого сваривания сила, необходимая для размыкания контакта, близка в той, с которой мы прижимали одну поверхность к другой. Это было бы очень неудобно, и к счастью это обычно не так. Значит, настоящего сваривания, образования сплошного материала не происходит – возможно, оксидная пленка выдавливается не вся (этот процесс не вполне исследован). Попутно заметим, что

если бы происходило настоящее сваривание, то коэффициент трения между металлами был бы всегда порядка единицы, поскольку при скольжении одной поверхности по другой сваренные микроконтакты должны были бы срезаться.

Третий вопрос – концентрация тока и перегрев. Раз контактные площадки малы, то плотность тока в них выше и, стало быть, возникает локальный разогрев. Сам по себе он не очень страшен – до плавления или испарения еще далеко. Но при росте температуры материал теряет упругость, начинает «течь». Особенно склонны к этому контакты в розетках, сделанные из тонких пластин. Эти вполне неподвижные контакты при нагреве иногда со временем теряют упругость, «ослабевают», и тогда холодильник, включенный десять лет назад, начинает «вырубаться». Надо искать, где он десять лет назад был подключен, находить нужный удлинитель и подтягивать винтики, подгибать контактики (не забыв выключить напряжение обоими предохранителями, а еще лучше – обеспечив то, что электрики называют «видимый разрыв»). Внешним признаком является нагрев контакта, в быту – нагрев розетки и запах изоляции. Как сказано у сэра Артура Кларка в романе «Лунная пыль»: «За свою многолетнюю работу инженером он слишком часто убеждался, чем грозит запах горячей изоляции».

Попробуем оценить сопротивление и нагрев контактов. Причем сопротивление важно и само по себе – из-за возникновения падения напряжения на контакте. Правильный расчет сопротивления контакта требует «нешкольной» математики, поэтому воспользуемся простой моделью, которая дает примерно правильный ответ. Будем считать, что контакт устроен так: это два цилиндра диаметром d (размер контактного пятна) и длиной $2d$ – т.е. зонами стягивания тока в обоих контактах (рис. 1). Тогда сопротивление одиночного контакта $R_1 = \frac{2\rho d}{\pi d^2/4}$, где ρ – удельное сопротивление. Если суммарная площадь контактов S , то всего у нас $N = \frac{S}{\pi d^2/4}$

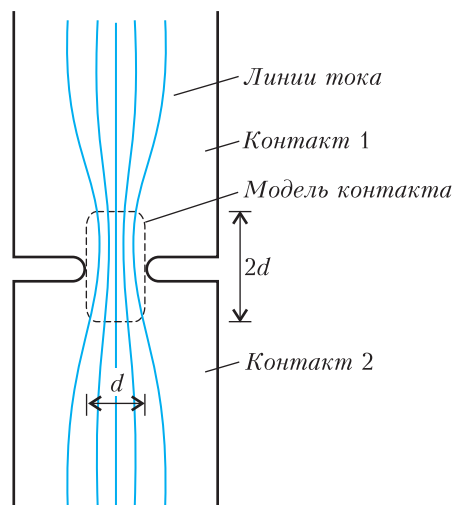


Рис. 1. Модель контакта

таких контактов и все они включены параллельно. Поэтому сопротивление контактной зоны $R = \frac{2\rho d}{S}$. Обратите внимание – сопротивление всего контакта при уменьшении d не возрастает, как можно было бы ожидать, а уменьшается. Потому что увеличение количества одиночных контактов оказывается «сильнее».

Пусть $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (медь), $S = 3 \cdot 10^{-9}$ м², d принимает значение от 40 нм (100 межатомных расстояний) до 0,4 мкм (обычная шероховатость контактов). Тогда $R = 4$ мкОм – 40 мкОм, и даже при токе $I = 100$ А (десять мощных чайников, включенных одновременно) и падение напряжения, и мощность, выделяющаяся в контакте, в целом малы. Но не перегревается ли именно контакт? Если по всему контакту протекает ток I , то по одиночному контакту протекает ток $I_1 = \frac{I}{N} = \frac{I\pi d^2}{4S}$ и, согласно Джоулю и Ленцу, при этом выделяется мощность $W_1 = I_1^2 R_1 = \frac{I^2 \rho \pi d^3}{2S^2}$. Эта мощность должна покинуть зону контакта через два сечения $\frac{\pi d^2}{4}$ (т.е. в обе стороны), удалившись на расстояние d , дальше она (как и ток!)

растекается по большой площади. Для этого контакт должен быть перегрет на $\Delta T = \frac{W_1 d}{2\lambda(\pi d^2/4)} = \frac{I^2 \rho d^2}{\lambda S^2}$, где λ – теплопроводность материала контактов, для меди это 400 Вт/(м·К). Подставляя все величины, получаем для слишком большой величины $I = 100$ А перегрев $\Delta T = 10^{-4}$ К – 10^{-2} К – пренебрежимо малые величины. Кажется, мы можем спать спокойно.

Теперь о сложном

Но давайте нырнем в задачу поглубже. Одиночные контакты включены параллельно, но почему мы считали, что они одинаковы? При использованных нами величинах S и d значения N оказываются от $2 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^4$, и некому следить, чтобы все d были одинаковы. А если величины d контактов различны, то и протекающие по ним токи будут различаться. Будут различаться и мощности – причем, поскольку токи будут обратно пропорциональны сопротивлениям, а в мощность ток входит в квадрате, то в контакте с меньшим сопротивлением мощность будет больше. В результате нагрева контактов при работе могут оказаться различными. Например, вы можете самостоятельно рассмотреть простую ситуацию, когда имеется две группы контактов – со значениями d_1 и d_2 , а количества контактов будут N_1 и N_2 .

Ситуация, когда у нас есть объекты, которые мы для простоты считаем одинаковыми, а на самом деле они различны, для физики не уникальна. И на это всегда надо обращать внимание, хотя переход к рассмотрению множества разных объектов бывает сложен. Иногда решением является разделение множества разных объектов на несколько групп. Помните, как выводится школьная формула $p = nkT$? Все молекулы делятся на 6 групп, причем эти группы считаются одинаковыми по численности. С контактами этот фокус не пройдет (да и с молекулами бывают сложности). Например, что будет, если стенка очень холодная или даже сорбирует газ? Тогда в нашей модели просто нет одной из групп.

С контактами есть и следующий уровень проблемы – они должны замыкаться и размыкаться. Обычно до замыкания между контактами есть напряжение. Если оно больше примерно 300 В, то при сближении контактов между ними может произойти пробой и возникнуть газовый разряд. Контакты еще не сомкнулись, а ток уже пошел, причем через относительно большое сопротивление газового (дугового) разряда с выделением соответствующей мощности, нагревом контактов, испарением, переносом материала с одного контакта на другой, плавлением... А тут как раз они сблизились и – бац! – сомкнулись, будучи нагреты чуть ли не до плавления. В итоге они сварились. Пока что это привело лишь к улучшению контактов, но ведь им же еще предстоит размыкаться.

Сваривание может происходить и без разряда. Истинная площадь контакта при микронных размерах устанавливается не мгновенно – за единицы и десятки микросекунд, а тепловой режим – за сотые и десятые доли микросекунд, т.е. в сто раз быстрее. Поэтому при замыкании контакт может успеть нагреться, если нагрузка допускает быстрый рост тока, т.е. не является индуктивной. Индуктивная нагрузка должна, казалось бы, контакты защитить. Не тут-то было!

При разрыве контактов все усугубляется менее быстрым, нежели при замыкании, их движением. Поэтому мощность, выделяющаяся при разрыве контакта из-за уменьшения площади истинного контакта и/или возникновения дугового разряда, успевает сильнее нагреть, больше расплавить и испарить. Мощные выключатели – не те, в которые вы тычете пальчиком, войдя в комнату, а которые выше вас ростом и отключают не люстры, а города, и иногда они вообще не могут разомкнуть цепь, потому что при разведении контактов загорается дуга, по которой и идет ток. Ситуация усугубляется тем, что при размыкании индуктивной нагрузки (точнее, при увеличении сопротивления «выключателя») на контактах увеличивается напряжение и происходит пробой. Каждый, кто пытался тестером проверить целост-

ность обмоток трансформатора, надолго запоминает болезненное ощущение, возникающее при размыкании цепи. Нет чтобы вспомнить вовремя абзац из школьного учебника про «ЭДС индукции» и не держать голыми пальцами концы проводов!

Проблемы эксплуатации

Технические критерии связаны с эксплуатационными параметрами, например со скоростью износа. Скажем, для обычной лампы накаливания каждое включение «съедает» около получаса срока службы самой лампы. Поэтому если лампа включается раз в сутки, то можно считать, что в смысле срока службы она работает в непрерывном режиме, а если раз в минуту – то в режиме непрерывных включений. Аналогичная зависимость есть и для мощных выключателей. Эксплуатационные параметры зависят, конечно, от физических и химических процессов, и зависимость эта не всегда известна.

Скользящие контакты обеспечивают протекание тока между движущимися одна относительно другой частями электрических машин, аппаратов и приборов. Такие контакты есть на кредитке и на симкарте, в электрических машинах это коллектор, кольца и щетки, в переменных сопротивлениях (реостатах) – контактные дорожки, обмотки и ползунки, в трамваях и троллейбусах – поднимите голову и посмотрите вверх, в сотовых телефонах-слайдерах – контакты, соединяющие части. Протекание тока должно быть непрерывным, причем сопротивление должно быть малым и не изменяться при движении. Иными словами, с точки зрения внешней схемы, скользящий контакт вообще должен быть «невидим». На самом деле это требование не соблюдается идеально: при движении одни контактные площадки разрываются, другие возникают, причем и при разрыве, и при замыкании сопротивление изменяется скачком. Поскольку все контактные площадки включены параллельно, разрыв каждой сказывается на сопротивлении несильно, но для некоторых случаев это существенно.

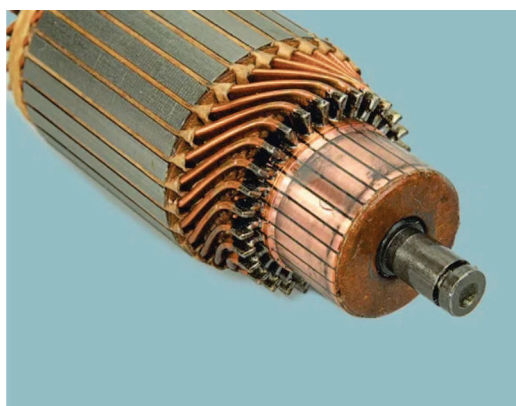


Рис. 2. Коллектор электродвигателя



Рис. 3. Реостат с переменным сечением проволоки для расширения диапазона регулирования (середина прошлого века)

Ситуация осложняется тем, что иногда скользящие контакты используются одновременно и как разрывные. Например, в коллекторных электрических машинах щетки скользят по каждой ламели (контакту на коллекторе), но при переходе с ламели на ламель они переключают обмотку (рис. 2). Промежуточная ситуация имеет место в проволочных реостатах (рис. 3) – движок контактирует с отдельными витками, но сами эти витки являются одной обмоткой. На витки она оказывается разделенной не по схемным, а по конструктивным соображениям: существовал бы металл со стократно большим удельным сопротивлением – делать реостат из длинной тонкой проволоки не потребовалось бы. Поскольку от этих скользяще-разрывных контактов обычно требуется непре-

рывность протекания тока, движок выполняется так, чтобы он контактировал с двумя витками или ламелями. Разумеется, сопротивление при этом все равно изменяется скачками, но, может быть, не такими большими.

Основная особенность скользящих контактов – то, что они подвержены трению и износу. При этом оксидная пленка, которая в обычных условиях быстро нарастает на металле и защищает его от дальнейшего окисления, сдирается и разрушение контакта может ускориться катастрофически. Когда-то была попытка ставить алюминиевые контакты на троллейбусы, так рассказывают, что в дождливую погоду по штангам и крышам вниз текло нечто молочно-белое. В трамваях алюминиевые контакты вроде бы работают, но провод подвешен так, что он скользит все время по разным частям контактной дуги, из-за чего нагрузка, как электрическая, так и механическая, падает. В применявшихся когда-то контактах в виде катящегося ролика нагрузка также была меньше, чем в неподвижных (понятно ли, почему?).

Вот почему именно на работу скользящих контактов окружающая среда влияет сильнее всего. Влажность, примеси агрессивных газов, дым и пыль, брызги морской воды, грибки – чудовищный компот, выживание в коем инженеры именуют «тропикоустойчивость». Не от хорошей жизни герметизируют реле (рис. 4, 5).

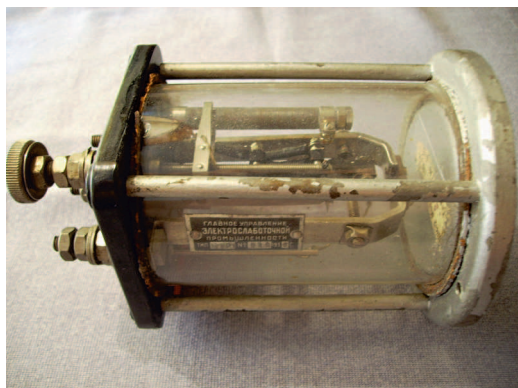


Рис. 4. Герметизированное реле для эксплуатации в загрязненной среде, на железной дороге (первая треть прошлого века)

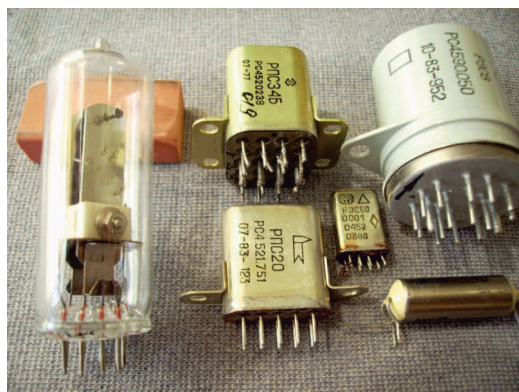


Рис. 5. Герметизированные реле: слева – вакуумированное в баллоне, как электронная лампа, справа – обычные

Выбор материала

Теперь понятно, почему контакты далеки от идеала, почему так сложна проблема выбора контактного материала – просто потому, что надо удовлетворить много разных требований. Но техника отличается от прочих областей жизни, в частности, тем, что в ней иногда удается «губы Никанора Ивановича да приставить к носу Ивана Кузьмича». Поскольку не только конструктор конструирует из имеющихся материалов, но и материаловед разрабатывает на потребу конструктору новые материалы.

Логика выбора материала для контактов в сильно упрощенном виде примерно такова. Прежде всего – электропроводность. Если делаем реле на малое напряжение или что-то иное, где сильно прижать контакты не удастся, самым важным будет вопрос об оксидных пленках. Они бывают разные – и по толщине, и по составу, и по прочности, и по сопротивлению. Тем более что сопротивление оксидов сильно зависит от небольших изменений их состава, а он зависит от примесей к основному материалу контактов, а также от состава газовой среды. Поэтому трудно предсказать, какой толщины и с каким сопротивлением окажется пленка на контакте. Окисление поверхности металла – многостадийный процесс, на него влияют и коэффициенты диффузии, и скорость диссоциации молекул газа, и даже электропроводность ок-

сидной пленки. Например, как ни странно, именно из-за высокого электрического сопротивления оксида алюминия медленно окисляется алюминий. Принято считать, что не окисляются (или окисляются так слабо, что электроны туннелируют через пленку) золото, платина и их сплавы с большим содержанием драгметалла. Добавки же к драгметаллам применяют либо для увеличения прочности и уменьшения механического износа, либо для увеличения технологичности (рис. 6).

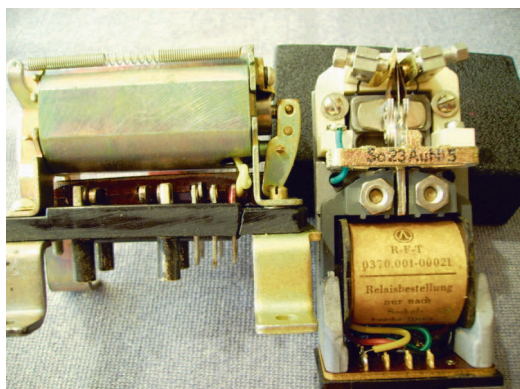


Рис. 6. Реле с весьма мощными контактами – слева, с «деликатными» – справа. На правом указан материал контактов – AuNi 5%

Два контакта, сжатых на некоторое время, могут свариться друг с другом и остаться в таком положении после снятия усилия. Это явление называют «прилипанием», оно объясняется текучестью и диффузией материалов и в результате – образованием «истинного контакта» большой площади. Процесс ускоряется при нагреве протекающим током. Прилипание возможно лишь для чистых металлов, не покрытых слоем оксида или иной пленки. При наличии пленок эффект прилипания ослабляется или прекращается. Разъединение контактов из абсолютно чистых отожженных благородных металлов, например платины или золота, возможно лишь после приложения больших усилий, почти равных усилиям, которые необходимы для разрушения монолитной структуры металла. Поэтому для уменьшения сваривания применяются добавки, увеличивающие прочность и тормозящие диффузию.

Для контактов средней мощности нажатие обычно обеспечить можно, и сопротивление пленок уже не столь существенно – они будут разрушены при контактировании. Тем более что реле и выключатели часто делают так, чтобы контакты «прыгали» навстречу друг другу, ударялись друг о друга или елозили друг по другу, разрушая пленки. Тогда важными оказываются электро- и теплопроводность самого материала – значит, преимущество будет за медью или серебром, может быть с упрочняющими добавками. Важным может оказаться и сваривание, значит, материал должен быть тугоплавким и с низким давлением пара. Это требование указывает на углерод, вольфрам, молибден. Но у них велико сопротивление. Выход – композит: вольфрамовая губка, пропитанная медью, или прессованная и спеченная смесь порошков меди и углерода.

Специфическая ситуация – скользящие контакты при большом и неизбежном износе, если предстоит работа под открытым небом с вытекающими отсюда последствиями в виде дождя или снега. Следовательно, надо брать либо что-то совсем дешевое и часто заменять, либо с малым трением и износом. Это случай троллейбуса с контактами для мокрой погоды – из стали или чугуна, самого дешевого металлического материала, износостойкого и антифрикционного, а для сухой погоды – из углеродных материалов (рис. 7). Или это трамвай с контактами из алюминия или стали.



Рис. 7. Контакты троллейбуса: справа – углеродный, слева – чугунные. Прорези – для скарпывания льда