

5-6 Электрические контакты. Основные процессы, протекающие между электрическими контактами.

Электрическим контактом называется зона перехода электрического тока из одной токоведущей части в другую. Поверхности, на которых осуществляется электрический контакт, называются контактными. Обеспечить такие же условия прохождения тока, как и в сплошном проводнике, в месте электрического контакта практически невозможно. Вследствие этого контактные соединения являются наиболее уязвимым местом электрического аппарата и требуют особого внимания как при его конструировании, так и в процессе эксплуатации.

Характеристики контактов электрических аппаратов:

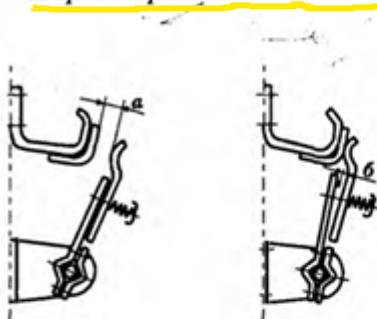


Рис 1.1. Раствор и провал контактов:
а — раствор; б — провал

раствор — кратчайшее расстояние между контактными поверхностями подвижного и неподвижного контактов в разомкнутом положении (рис. 1.1, а);

нажатие — усилие, с которым одна контактная поверхность воздействует на другую;

начальное нажатие — нажатие пружин на контакт при разомкнутом положении контактов;

конечное нажатие — нажатие в момент окончания замыкания подвижного контакта с неподвижным;

провал — расстояние, на которое может сместиться подвижный контакт, если убрать неподвижный (рис. 1.1, б).

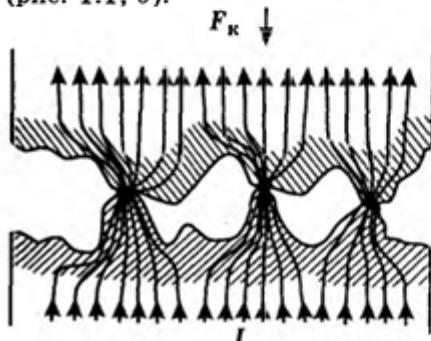


Рис 1.2. Примерная картина прохождения тока в электрическом контакте

не получится ни при каком способе обработки.

Поверхность контактов должна быть хорошо обработана для обеспечения достаточной площади соприкосновения, а следовательно, и проводимости электрического тока. Однако, как бы ни была тщательно обработана поверхность соприкосновения контактов, электрический ток проходит из одного контакта в другой только в отдельных точках, где две поверхности контактируют друг друга контактирующими выступами, так как абсолютно гладкая поверхность

При нажатии одного контакта на другой вершины выступов сминаются, в результате образуются площадки действительного касания контактов (рис. 1.2).

Рассмотрим процесс перехода тока из одного контакта в другой при касании двух цилиндрических контактов на торцах [2].

Выделим одну площадку касания. Предположим, что она имеет форму круга радиусом a (рис. 1.3, а).

Радиус a при пластической деформации можно определить по формуле

$$\pi a^2 = F_k / \sigma, \quad (1.1)$$

где F_k — сила нажатия контактов, Н;

σ — временное сопротивление материала контакта смятия, Н/м.

В результате того что линии тока стягиваются к площадке касания, путь тока изменяется. Сечение проводника, через которое фактически проходит ток, становится меньше, что вызывает увеличение сопротивления прохождению тока.

Сопротивление в области точки касания, обусловленное явлениями стягивания линий тока, называется переходным сопротивлением контакта. Оно зависит от силы нажатия F_k . Зависимость переходного сопротивления от силы нажатия различна для контактных материалов (латуни, меди, серебра): чем сильнее нажатие, тем меньше переходное сопротивление, чем тверже материал, тем сильнее должно быть нажатие.

Растекание тока в области стягивания линий тока (рис. 1.3, а) аналогично картине растекания тока из плоского диска радиусом a в полубесконечную среду.

Учитывая, что размеры области стягивания малы по сравнению с размерами тела контакта, реальные контакты можно заменить полубесконечными телами (рис. 1.3, б). Для двух полубесконечных тел, контактирующих по одной круглой площадке касания, картина поля тока I и электрических потенциалов ϕ представлена на рис 1.3, б.

Эквипотенциальные поверхности являются полуэллипсоидами вращения, линии тока — гиперболами с общим фокусом. Для такой идеализированной картины растекания тока в контактах переходное сопротивление определяется по уравнению:

$$R_k = \rho / 2a. \quad (1.2)$$

С точностью до 5 % эта формула справедлива, если поперечные размеры контакта в 15 раз превосходят диаметр площадки касания [2]. На практике в большинстве случаев это условие соблюдается, так как размеры площадки касания обычно не превышают долей миллиметра.

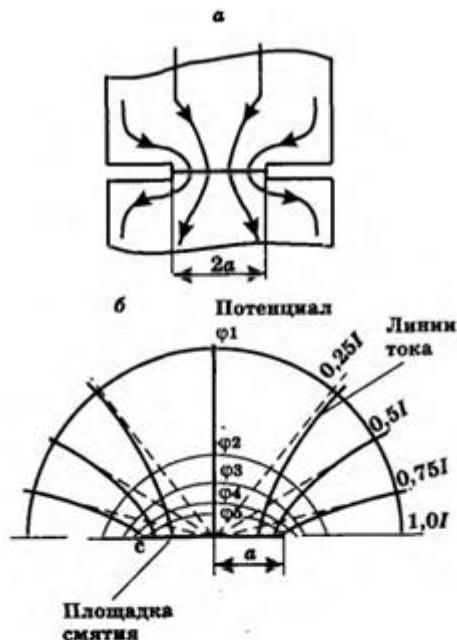


Рис 1.3. Идеализированная картина растекания тока в одноточечном контакте:

а — площадка касания;

б — картина поля тока I и электрических потенциалов φ

Если определить радиус площадки a по формуле (1.1) и подставить его значение в уравнение (1.2), получим

$$R_k = \rho\sqrt{\pi\sigma}/2\sqrt{F_k} = k/F_k^{1/2}, \quad (1.3)$$

где $k = \rho\sqrt{\pi\sigma}/2$.

Таким образом, сопротивление, обусловленное стягиванием линий тока, пропорционально удельному сопротивлению, корню квадратному из временного сопротивления на смятие материала σ и обратно пропорционально корню квадратному из силы нажатия на контакты.

Одноточечный контакт используется в основном только при малых токах коммутации. При больших токах применяется многоточечный контакт. Поскольку ток проходит через несколько контактных переходов, включенных параллельно, переходное сопротивление уменьшается по сравнению с одноточечным контактом.

Количество контактирующих точек возрастает с увеличением силы нажатия по весьма сложному закону. При этом переходное сопротивление определяется по формуле

$$R_k = k/F_k^n, \quad (1.4)$$

где n — показатель степени; $n = 0,5$ — для одноточечного контакта; $n = 1,0$ — для поверхностного контакта.

Сопротивление R_k зависит от способа обработки поверхности контакта. Если поверхность контактов шлифованная, на ней остаются более пологие выступы с большим сечением. Смятие таких выступов возможно только при больших силах нажатия. В связи с этим сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов при более грубой обработке, например, после обработки напильником.

В месте соприкосновения контактов при окислении металла на поверхности образуются пленки с очень высоким удельным сопротивлением (до 10^4 Ом·м) [2]. Если напряжение замыкаемой цепи очень мало или нажатие на контакты является недостаточным, контакты иногда вообще не пропускают ток. Для того чтобы ток проходил, нужно увеличить или нажатие контактов, чтобы разрушить пленку, или напряжение цепи, чтобы произошел пробой образовавшейся пленки.

Как только свежеччищенная поверхность контактов соприкоснется с кислородом воздуха, вновь начнется процесс образования оксидной пленки и переходное сопротивление может возрасти в десятки тысяч раз. В связи с этим контакты аппаратов на малые токи (малые нажатия) изготавливают из благородных металлов, которые не позволяют образоваться оксидным пленкам (золото, платина и др.)

В силовых контактах электрических аппаратов, коммутирующих большие токи, пленка оксидов разрушается благодаря большим нажатиям или путем самозачистки за счет проскальзывания одного контакта относительно другого при включении аппарата.

При прохождении тока через область стягивания линий тока контакт нагревается. Если температура будет увеличиваться, то наступает плавление металла в точках касания и происходит сваривание контактов.

Рассмотрим процессы, которые протекают при включении и отключении электрической цепи.

Включение цепи. При включении контактов могут наблюдаться следующие процессы: вибрация контактов; эрозия в результате образования разряда между сходящимися контактами.

Рассмотрим **причины возникновения вибрации** на примере контактного механизма электромагнитного контактора (рис.1.4).

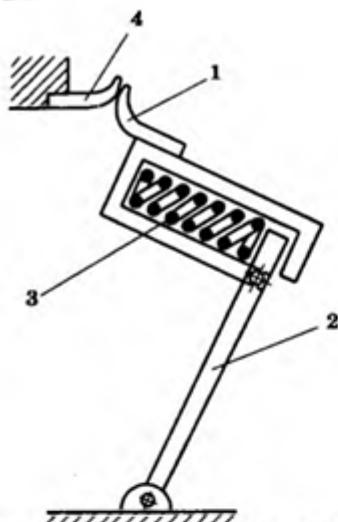


Рис 1.4. Контактный механизм электромагнитного контактора

Подвижный контакт 1 связан с контактным рычагом 2 с помощью контактной пружины 3. **Неподвижный контакт 4** жестко закреплен на опоре. Электромагнитный механизм контактора воздействует на рычаг 2. **В момент соприкосновения** контактов они **соударяются**, в результате чего происходит деформация смятия контактов и **контакт 1 отклоняется назад**, т.е. **вправо**. **Между контактами образуется зазор и загорается электрическая дуга**. Движение контакта 1 вправо прекращается тогда, когда энергия, полученная им при ударе, перейдет в энергию сжатия пружины 3. **После этого контакт 1 под действием пружины 3 начнет пере-**

мещаться влево. Произойдет новое касание и отклонение контакта. **Это явление называется вибрацией контактов**, что вызывает **многократное образование короткой дуги. Это приводит к сильному оплавлению и распылению металла контактов.**

Для уменьшения вибрации контактов пружина 3 имеет предварительную деформацию (натяг) при разомкнутых контактах. В момент касания контактов сила нажатия возрастает не с нуля, а с предварительного начального нажатия контактов. На вибрацию контактов влияет также момент инерции, с возрастанием которого вибрация увеличивается. В связи с этим контакты должны быть достаточно легкими.

При включении на существующее короткое замыкание вибрация контактов усиливается из-за возникновения отбрасывающих сил в точке касания.

Для того чтобы не было оплавления контактов в момент их соприкосновения, необходимо предварительную силу натяга контактной пружины компенсировать за счет электродинамических сил отклонения и создавать такое нажатие, чтобы падение напряжения на переходном сопротивлении не приводило к плавлению точки касания.

В аппаратах, рассчитанных на токи короткого замыкания, электродинамические силы в контактах столь значительные, что контактные пружины должны развивать усилия в несколько тысяч ньютонов.

При включении цепи по мере приближения подвижного контакта к неподвижному возрастает напряженность электрического поля между контактами и, при определенном расстоянии, произойдет пробой промежутка. В дуговую форму разряд не переходит, так как подвижный контакт продолжает двигаться и, замыкая промежуток, прекращает разрядные процессы. Однако возникающие при пробое электроны бомбардируют анод и вызывают его износ. Металл анода оседает на катоде в виде тонких игл.

Износ контактов в результате переноса материала с одного контакта на другой, испарение в окружающее пространство без изменения состава материала называются электрическим износом или эрозией. При замыкании контактов эрозия незначительная, но при малых нажатиях и небольших расстояниях между контактами она может привести к их спеканию.

В аппаратах высокого напряжения при сближении контактов пробой происходит при больших расстояниях. Возникающая дуга между контактами с большим током горит относительно долго, при этом возможно сваривание контактов.

Отключение цепи. При размыкании контактов сила нажатия уменьшается, переходное сопротивление возрастает, поэтому увеличивается температура точек касания. В момент разъединения контактов она достигает температуры плавления и между контактами возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и в зависимости от параметров отключаемой цепи возникает дуговой или тлеющий разряд.

При возникновении дугового разряда температура достигает точки плавления материала контактов. Отмечаются интенсивное окисление, распыление материала контактов в окружающее пространство, перенос материала с одного контакта на другой и образование пленок, следовательно, происходит износ контактов.

Износ, связанный с окислением, образованием на контактах пленок химических соединений материала контактов со средой, называется химическим износом или коррозией.

Перенос материала с одного контакта на другой наиболее вреден при постоянном токе, так как направление переноса не изменяется, что приводит к потере массы или объема и выходу контакта из строя.

Основными средствами борьбы с эрозией в аппаратах, рассчитанных на токи от 1 до 600 А, являются сокращение длительности горения дуги за счет применения дугогасительных устройств; устранение вибрации контактов при включении; применение контактов из дугостойких материалов, имеющих высокую температуру плавления.

Подвижный контакт должен иметь определенную скорость движения и определенный ход в зависимости от конструкции аппарата, номинального тока и напряжения.

К материалам, из которых изготавливают контакты, предъявляются следующие требования: высокая электропроводность и теплопроводность; стойкость против коррозии в воздухе и других газах; стойкость против образования оксидных пленок с большим удельным сопротивлением; низкая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия; высокая дугостойкость (температура плавления); высокая механическая прочность (уменьшает механический износ и позволяет сохранять форму контактной поверхности); достаточная вязкость (позволяет контактам хорошо прирабатываться друг к другу, снижает переходное сопротивление); невысокая стоимость.

Электротехническая медь — химически чистая медь, полученная электролизом. Она удовлетворяет почти всем требованиям, предъявляемым к материалам, из которых изготавливают контакты, и широко используется в контактных соединениях — как взаимоподвижных, так и взаимонеподвижных. Основным ее недостатком — сильная окисляемость, причем оксидная пленка имеет высокое удельное сопротивление.

Для защиты меди от окисления поверхность контактов покрывают слоем серебра 20...30 мк электролитическим способом. Кроме того, используются контакты с напаянными серебряными пластинками.

Кадмиевая медь — электротехническая медь с присадкой кадмия. Она обладает очень высокими механическими свойствами, хорошо противостоит истиранию. Дугостойкость ее значительно выше, чем у обычной электротехнической меди, а свариваемость существенно ниже.

Серебро имеет высокую электро- и теплопроводность. Пленка оксида серебра отличается низким сопротивлением. Благодаря малой механической прочности, контакты, изготовленные из серебра, успешно работают при малых нажатиях.

Малая дугостойкость и недостаточная твердость серебра препятствуют его использованию при образовании сильной дуги, частых включениях и отключениях. Серебряные контакты применяются в контактах реле, электромагнитных контакторах, пускателях и рассчитаны на токи до 20 А.

Латунь — сплав меди с цинком. Этот материал применяется для изготовления дугогасящих контактов в высоковольтных аппаратах.

Бронза — сплав меди с оловом, а также безоловянные бронзы — сплавы меди с алюминием, марганцем, никелем, кремнием и другими присадками. Применяется в качестве материала для контактов, у которых контактное нажатие создается

пружинящими свойствами самого материала (например, контактные стойки предохранителей). Такие контакты не могут разрывать электрическую дугу, так как при нагреве теряют свои пружинящие свойства.

Алюминий имеет достаточно высокую электро- и теплопроводность. Его удельный вес $\approx 48\%$ меньше, чем меди. Контакты из алюминия не изготавливают. Он используется как конструкционный материал для деталей аппаратов. Недостатком алюминия является его низкая механическая прочность (болтовые соединения быстро ослабевают и теряют контактное нажатие).

Вольфрам отличается высокой дугостойкостью, большой стойкостью против эрозии, сваривания. Высокая твердость вольфрама позволяет применять его при частых включениях и отключениях.

Недостатками этого металла являются высокое удельное сопротивление, низкая теплопроводность, образование прочных оксидных и сульфидных пленок. Вольфрамовые контакты требуют большого нажатия в связи с высокой механической прочностью и образованием пленок.

В реле на малые токи с небольшим нажатием контактов применяются стойкие против коррозии и окисления материалы (золото, платина, палладий и их сплавы).

Ни один из перечисленных металлов идеально не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к контактам.

Основные свойства контактных материалов — высокая электропроводность и дугостойкость могут быть получены за счет сплавов таких металлов, как серебро и вольфрам, медь и вольфрам. Эти металлы не образуют сплавов, соединение их осуществляется механическим способом. Такое соединение получило название металлокерамика.

Металлокерамика — механическая смесь двух практически несплавления материалов. Ее получают спеканием смеси из порошков или пропитывают один материал другим. Металлокерамика появилась благодаря тому, что нужен был материал, который наиболее полно отвечал бы требованиям, предъявляемым к материалу контактов. Обычно один из металлов обладает хорошими электрическими свойствами (низким удельным сопротивлением, малой окисляемостью), а второй — высокими механическими и дугостойкими свойствами. Металлокерамика в какой-то степени объединяет свойства разнородных металлов.

Наибольшее распространение получила металлокерамика на основе серебра: серебро — никель, серебро — окись кадмия, серебро — вольфрам, серебро — молибден и др. Дугостойкость металлокерамических контактов обусловлена применением та-

ких металлов, как вольфрам и молибден. Для получения низкого переходного сопротивления контактов используется серебро или медь. Наличие прочных тугоплавких частичек создает своеобразную решетку, удерживает расплавленные частицы серебра и препятствует их объединению в достаточно большие капли. Вследствие этого серебряная металлокерамика при всех положительных качествах серебра (высокая электропроводность, стабильное низкое переходное сопротивление) обладает также достаточной дугостойкостью и износостойкостью, плохо сваривается. Применяется в виде напаянок на основные детали контактов как в слаботочных, так и в силовых контактах. Стоимость серебряной металлокерамики несколько ниже стоимости чистого серебра.

Чем больше в материале вольфрама, тем выше его дугостойкость, механическая прочность, сопротивление свариванию, но увеличивается сопротивление контактов и уменьшается теплопроводность.

Металлокерамика, в которой содержится более 50% вольфрама, применяется в контактах для силовых выключателей, отключающих большие токи короткого замыкания.

Серебряно-графитные и медно-графитные контакты благодаря высокой устойчивости против сваривания используются в качестве дугогасительных контактов, а чаще для изготовления контактов, имеющих в процессе работы постоянное искрение (например, щетки электрических машин).

Конструкция контактов. Конструкция контактных соединений и контактов электрических аппаратов разнообразна и зависит от величины тока, тока КЗ в цепи, напряжения, режима работы и назначения аппарата. Для электрических аппаратов управления и защиты применяются разрывные контакты нескольких видов: розеточные, роликовые токосъемные, контакты с самоустанавливающимся мостиком, контакт с перекачиванием подвижного контакта, герметизированные.

В процессе работы контакты в большинстве электрических аппаратов разрывают цепь с током, который превышает ток дугообразования. Возникающая при этом электрическая дуга вызывает преждевременный износ контактов.

Для надежного гашения дуги, образующейся при отключении, между неподвижным и подвижным контактами необходимо создать определенное расстояние — расстор (рис. 1.5). В реальных аппаратах это расстояние устанавливается с запасом.

В зависимости от конструкции крепления контактов изменяются количество контактируемых точек соприкосновения и стабильность контакта.

Контакт, имеющий возможность свободно устанавливаться на поверхности, имеет максимальную площадь касания.

Такой контакт называется **самоустанавливающимся** (рис. 1.5). Неподвижные контакты 1 и подвижный мостиковый контакт 2 в месте касания имеют сферические (или цилиндрические) напайки 3, выполненные из серебра или металлокерамики. Нажатие контактов создается пружиной 4. После касания контактов скоба 5, связанная с якорем электромагнита, продолжает двигаться вверх на величину, равную провалу контакта.

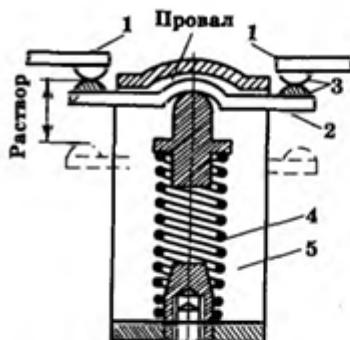


Рис 1.5. **Самоустанавливающийся контакт мостикового типа**

электромагнита. При включении центр O_1 перемещается по дуге с радиусом $O_2O_1(I)$. Касание пальцев 1 и 2 происходит в точке a (II). При дальнейшем перемещении центра O_1 точка касания переходит в точку b (III). Контакт 2 перекачивается по контакту 1 с небольшим проскальзыванием. При этом пленка оксида на контактах стирается.

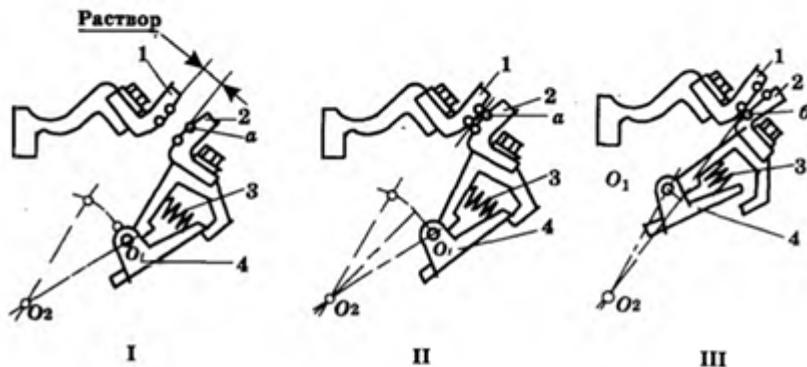


Рис 1.6. **Пальцевая система контактов с перекачиванием контактирующих поверхностей**

В контактах мостикового типа пленка оксида металла не стирается, поэтому чисто медные контакты здесь не применяются.

На рис. 1.6 показана **пальцевая система с перекачиванием**, которая широко применяется в контакторах с медными контактами. Контактный рычаг 4 связан с якорем

Таким образом, точка контакта б-б является основной, а точка контакта а-а -- вспомогательной. В точке а-а ток проходит только в моменты включения и выключения, а в точке б-б – всё время.

При отключении дуга загорается между точками а - а, что защищает от оплавления точки б - б, в которых контакты соприкасаются во включенном положении. Таким образом, контакт удастся разделить на две части: в одной происходит гашение дуги, в другой ток проводится длительно.

Во всех аппаратах, коммутирующих электрическую цепь, существует провал контактов, который обеспечивает необходимое нажатие. Вследствие обгорания и износа контактов в процессе эксплуатации провал уменьшается, что приводит к снижению силы нажатия и увеличению переходного сопротивления контактов. В период эксплуатации провал контактов следует систематически контролировать. Он должен находиться в пределах, требуемых заводом-изготовителем. Это требование особенно относится к аппаратам, работающим в режиме частых включений и отключений (контакторы, магнитные пускатели), где износ контактов является особенно интенсивным. У торцевых контактов мостикового типа провал обычно составляет 3... 5 мм.