

1 Физические основы электростатики и ЭСР

Equation Chapter 1 Section 1

Equation Chapter 1 Section 1

В данной главе рассматриваются причины возникновения, накопления и длительного сохранения электрических зарядов в материалах.

1.1 Электрический заряд и его образование

1.1.1 Общие представления

Напомним некоторые физические основы образования электростатических зарядов, необходимые для дальнейшего рассмотрения.

Атом любого вещества состоит из положительно заряженного ядра и окружающей его электронной оболочки, имеющей отрицательный заряд. Ядро, в свою очередь, состоит из протонов, имеющих положительный заряд, и нейтронов, нейтральных в электрическом отношении. По абсолютной величине, как заряд протона, так и электрона равен минимально возможному электрическому заряду (элементарному заряду), составляющему $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Каждый атом имеет равное количество протонов и электронов и поэтому нейтрален в электрическом отношении. К атому, однако, может присоединиться один или несколько электронов. Наоборот, электрон или несколько электронов могут отделиться от атома. В любом из этих вариантов атом теряет электронейтральность. Атом, или группу атомов, которые приобрели, или потеряли определенное количество электронов, называют соответственно отрицательным или положительным ионом.

Взаимодействие двух неподвижных точечных зарядов определяется законом Кулона: сила электростатического взаимодействия между двумя зарядами прямо пропорциональна значениям этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Заряды, имеющие одинаковый знак, отталкиваются друг от друга, а имеющие разные знаки - притягиваются. Если имеется несколько зарядов, то сила, действующая на один заряд, подсчитывается путем сложения воздействий всех зарядов.

Вокруг каждого заряда или группы зарядов образуется электрическое поле, причём действие этих зарядов на отдаленные объекты проявляется как воздействие этого поля. Если в группу таких зарядов внести заряд q , то на него будет действовать сила F , прямо пропорциональная заряду q . При этом напряженность электростатического поля E в точке, где находится заряд q , можно описать выражением:

$$E = \frac{F}{q} \quad (1.1)$$

Определение напряженности поля подобным образом предполагает, что заряд q является достаточно малым и не нарушает установившееся расположение остальных зарядов. Если заряд q является положительным, то сила, действующая на него, имеет то же направление, что и электростатическое поле, а если заряд отрицательный, то направление будет противоположным направлению поля. Таким образом, если в зоне действия поля имеются положительные и отрицательные ионы, то это поле действует на них в противоположных направлениях. Происходит поляризация зарядов.

Заряды в проводниках переносятся электронами, которые свободно переходят от одного атома к другому. Протоны, в свою очередь, не могут передвигаться, если атомы остаются неподвижными. В твердых веществах, где атомы только совершают колебания относительно своего фиксированного положения и не могут свободно перемещаться,

ионы переносить заряды, естественно, не могут. В жидкостях и газах могут перемещаться, перенося заряд, как электроны, так и ионы.

Под действием силы взаимодействия заряд, состоящий из многих электронов, передвигается и проявляется только на поверхности твердого заряженного предмета, концентрируясь на углах и других заостренных частях этого предмета.

Электрический заряд обладает определенной потенциальной энергией в каждой точке электрического поля. Если изолированный предмет, обладающий свойством электропроводности, получает определенный заряд, то его потенциал повышается. Емкость представляет собой коэффициент пропорциональности между напряжением и зарядом. Связь между зарядом, емкостью и напряжением выражается следующим образом:

$$Q = C \cdot U \quad (1.2)$$

где Q - заряд, Кл; C - емкость, Ф; U - напряжение, В.

1.1.2 Возникновение электрических зарядов

Электрические заряды в материалах могут возникать при разрыве контакта между ними, при деформации материалов, при их трении друг о друга. Кроме того, они могут возникать при получении этих материалов, их переработке и эксплуатации.

Возникновение зарядов при разрыве контакта. При соприкосновении двух тел (контакте) происходит перераспределение зарядов, и, когда тела разъединяются, это неравномерное распределение зарядов на них сохраняется (рис. 1.1). Материал, который теряет электроны, становится положительно заряженным, а материал, их получающий – отрицательно заряженным.

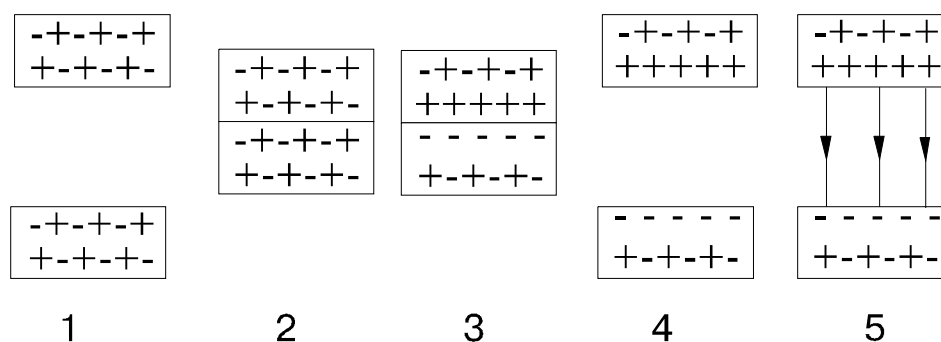


Рис. 1.1. Образование статического электричества при разрыве контакта: 1 – предметы, не имеющие заряда; 2 – соприкосновение; 3 – перераспределение зарядов; 4 – разъединение; 5 – электрическое поле, образуемое статическим электричеством.

Чаще всего эти заряды сами по себе постепенно разряжаются, и их присутствие остается незаметным. Но при определенных условиях заряд остается в предметах и даже может накапливаться. Тогда в них образуется статическое электричество, интенсивность которого зависит, в первую очередь, от сочетания предметов, находившихся в контакте, электропроводности материалов, размера и количества точек соприкосновения, а также от скорости разъединения предметов.

Процесс возникновения и дальнейшего накопления электрических зарядов в материале называется *электризацией* этого материала.

Возникновение зарядов при трении. Образование электрических зарядов в материалах происходит также при их трении друг о друга. При этом вследствие неровностей поверхностей контактирующих материалов на отдельных участках при перемещении этих материалов имеет место последовательный многократный контакт и

разрыв контакта, сопровождающийся электризацией материалов. Это явление называется **трибоэлектрическим эффектом**.

Для оценки того, как будут заряжаться материалы при их трении друг о друга их обычно располагают в трибоэлектрический ряд. В этом ряду материалы, стоящие ближе к минусу, будут приобретать отрицательный заряд по отношению к материалу, стоящему ближе к плюсу.

Согласно правилу Кена отрицательно заряжаются материалы с большей диэлектрической проницаемостью. Заметим, что, как правило Кена, так и порядок заряжения согласно трибоэлектрическому ряду соблюдается далеко не всегда. Примером этого служит так называемое “Трибоэлектрическое кольцо” (рис. 1.2). При трении шёлка о стекло последнее заряжается отрицательно. В свою очередь, при трении стекла и металлического цинка тот приобретает отрицательный заряд. Наконец, в паре трения цинк – шёлк отрицательно заряжается шёлк. Но стекло выше шёлка, а шёлк выше цинка в трибоэлектрическом ряду.

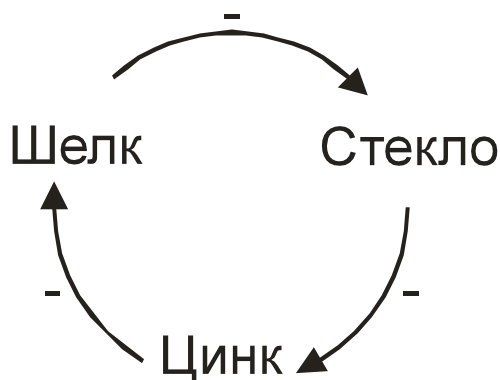


Рис. 1.2 Трибоэлектрическое кольцо «Шёлк – стекло - цинк».

Возникновение зарядов при деформации материала. Было установлено, что при деформации диэлектрических материалов происходит возникновение электрических зарядов. Это явление также связано с перераспределением зарядов в диэлектрике при воздействии механической нагрузки и его называют **электроэластическим эффектом**. Этот эффект имеет большое практическое значение при переработке каучуков и вытяжке волокон.

Концентрация зарядов в материале зависит от конфигурации конкретного предмета. Чем острее углы, тем выше концентрация зарядов в них.

Заряд часто сохраняется в материалах, обладающих низкой электропроводимостью - пластмассе, резине, нефти, бензине, текстиле и т. п., но также и в электропроводящих материалах, если они изолированы от земли. Человек может получить заряд, если подошвы его обуви являются изоляторами, или, если он идет по полу, покрытому изоляционным материалом.

Статические заряды могут также образовываться в облаках пыли, тумана и пара, если имеющиеся в них ионы с разными зарядами разъединяются и теряют электрическое равновесие. Если это происходит в природных условиях в больших масштабах, то возникает гроза. При этом электрическое напряжение между облаками или между облаками и землей достигает таких показателей, что разряд происходит в виде молнии.

Таблица 1.1

Трибоэлектрический ряд

Знак заряда	Материал
-------------	----------

+	Атмосфера руки кроличий мех стекло слюда волосяной покров тела человека нейлон овечий мех свинец шелк алюминий бумага
±	хлопчатобумажная ткань
-	сталь дерево янтарь эбонит никель, медь цинк латунь, серебро золото, платина сера ацетатный шелк полиэфир целлулоид полиуретан полиэтилен полипропилен винил полихлортрифторэтилен кремний тефлон

1.2 Накопление зарядов в материалах

Способность жидкого или твердого тела накапливать опасные электростатические заряды зависит от их удельного или поверхностного сопротивления. Удельное объемное сопротивление обычно выражается в $Ом·см$, а поверхностное сопротивление в $Ом·см^{-2}$. Непроводящие и плохо проводящие материалы склонны к накоплению электростатического заряда, в то время как на проводящих материалах заряды, как правило, не образуются. Необходимо заметить, что на объекте из проводящего материала может образоваться электростатический заряд, но он не будет сосредоточенным на определенном участке, а будет распределяться по всей длине объекта.

1.2.1 Отношение материалов к статическому электричеству

К материалам, которые обладают способностью к накоплению статического электричества, относятся следующие:

- жидкости, удельное сопротивление которых выше $10^{10} Ом·см$;
- твердые тела, сопротивление которых выше $10^6 Ом$ ($1 МОм$);
- частицы твердых тел и жидкости независимо от их удельного сопротивления.

Граница между диэлектриками и проводниками не может быть точно определена, поскольку зависит от конкретных условий и конкретной опасности, связанной с образованием статических зарядов.

К материалам, на которых не образуются статические заряды, то есть к материалам, которые являются проводящими по отношению к статическому электричеству, можно отнести следующие:

- твердые тела и жидкости, удельное сопротивление которых меньше 10^{10} Ом·см;
- проводящие материалы, соединенные с землей.

Все материалы в зависимости от отношения к статическому электричеству подразделяются на:

- проводящие,
- диссипативные,
- материалы электростатического экранирования,
- изоляционные и
- не электризующиеся материалы (табл. 1.2).

Рассмотрим их подробнее.

Таблица 1.2

Параметры материалов в зависимости от отношения к статическому электричеству

Тип материала	Поверхностное удельное сопротивление, Ом/см ²	Объемное удельное сопротивление, Ом/см ²
Проводящий	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$
Диссипативный	$> 1 \times 10^5, < 1 \times 10^{12}$	$> 1 \times 10^4, < 1 \times 10^{11}$
Электростатическое экранирование	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^3$
Изоляционный	$< 1 \times 10^{12}$	$< 1 \times 10^{11}$
Не электризующийся	Не определено	Не определено

Проводящие материалы определяются как имеющие поверхностное сопротивление менее 1×10^5 Ом/см², или объемное удельное сопротивление менее 1×10^4 Ом·м. В этих материалах из-за низкого сопротивления электроны легко перемещаются по поверхности и в толще материала. Заряды достигают границ материала и других проводящих материалов, если с ними имеется контакт.

Для **диссипативных материалов** поверхностное сопротивление лежит в диапазоне значений от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^{12}$ Ом/см²; а объемное удельное сопротивление от $1 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^{11}$ Ом·м. В этих материалах подвижность меньше, чем в проводящих.

Материалы для **электростатического экранирования** имеют поверхностное сопротивление менее 1×10^4 Ом/см², а удельное сопротивление менее $1 \cdot 10^4$ Ом·м. Эти материалы пригодны для создания электростатических экранов типа “клетки Фарадея”.

Изоляционные материалы имеют поверхностное сопротивление не менее $1 \cdot 10^{12}$ Ом/см², а удельное сопротивление $1 \cdot 10^{11}$ Ом·м. Высокое сопротивление препятствует движению электронов, и заряды остаются неподвижными в течение длительного времени.

Неэлектризующиеся материалы характеризуются весьма слабой способностью в отношении трибозффекта. Параметры сопротивления для этой группы материалов жестко не лимитированы.

Последние документы по стандартизации свойств и параметров материалов в электронной промышленности, касающиеся статического электричества используют новый термин для определения не электризующихся материалов: "слабо заряжаемые". Термин предложен МЭК ТК 101 по электростатике и считается, что он более точно отражает физические явления, происходящие при взаимодействии поверхностей двух тел. Термин «не электризующийся» часто используют в универсальном смысле для характеристики различных материалов.

1.2.2 Изоляционные материалы с быстрым объемным стеканием заряда

Статическое электричество предъявляет противоречивые требования к используемым диэлектрикам. уменьшению времени рассасывания зарядов определяет требований к изоляторам. С одной стороны диэлектрик должен обладать хорошими изоляционными свойствами, а с другой стороны - некоторой проводимостью, уменьшающей время рассасывания зарядов.

Было предпринято много усилий, чтобы придать изоляционным материалам соответствующую проводимость без того, чтобы нарушить их изоляционные свойства. Обычно, это достигается, смешивая материал с проводящими добавками. Наиболее известный пример такой добавки для снятия статических зарядов - углеродная сажа. Сажа может быть добавлена к ряду полимерных материалов и используется при возможном применении тёмного материала.

Многие годы наиболее важной областью использования для углеродной сажи была электропроводящая резина. Обыкновенный вулканизированный каучук может иметь объемное удельное сопротивление 10^{13} Ом·м, но добавка углеродной сажи может понизить удельное сопротивление до 10^{15} Ом·м. Обычно, удельное сопротивление приблизительно 10^5 - 10^6 Ом·м. достаточно низко, чтобы предотвратить опасные накопления заряда.

Электропроводящая резина используется в стационарных рабочих зонах, системах трубопроводов для наркозных аппаратов, колес на тележках, подошвы для антистатической обуви и автомобильных шин. Шофёр может получить заряд при скольжении по чехлу кресла. В результате, разряд может проскакивать между человеком и любой металлической частью автомобиля, который является фактически под потенциалом земли.

Другое применение углеродной сажи находит в производстве твердого и текстильного покрытия пола с антистатическими свойствами, при котором используются комбинации полиамидных нитей и волокон и углеродной сажи.

Наиболее важное использование углеродной сажи является, без сомнения, в электронной промышленности. Это основной материал для лотков крепежных элементов, обойм, зондов, ящиков, и другой тары для внутрискладского перемещения штучных грузов, резервуаров, и т.д. Эти предметы сделаны достаточно проводящими, чтобы гарантировать быструю нейтрализацию статических зарядов непосредственно на материале.

1.2.3 Изоляционные материалы с быстрым поверхностным стеканием заряда

Обычно, добавка сажи в диэлектрик выполняется равномерно по всему объёму материала, чтобы увеличить объемную проводимость, но может также потребоваться покрытие в виде проводящего поверхностного слоя.

Поверхностная проводимость материала является одним из важнейших параметров. Она определяет способность к нейтрализации зарядов.

Для некоторого объёма плотность тока j определяется объёмной проводимостью σ и напряжённостью электрического поля E :

$$j = \sigma \cdot E \quad (1.3)$$

или

$$E = \rho \cdot j \quad (1.4)$$

где ρ – удельное объёмное сопротивление.

Если напряжённость E_s определяет ток с плотностью j_s , протекающий по поверхности с проводимостью σ_s , то уравнения (1.3) и (1.4) можно записать в виде:

$$j_s = \sigma_s \cdot E_s \quad (1.5)$$

$$E_s = \rho_s \cdot j_s \quad (1.6)$$

где $\rho_s = 1/\sigma_s$ - поверхностное удельное сопротивление.

Из (1.6) получаем:

$$\rho_s = \frac{E_s}{j_s} \quad (1.7)$$

Сопротивление поверхностного слоя определяется известным соотношением:

$$R_s = \rho \cdot \frac{l}{wd} \quad (1.8)$$

где ρ_s – удельное поверхностное сопротивление, l , w , d – соответственно длина, ширина и толщина образца (рис. 1.3).

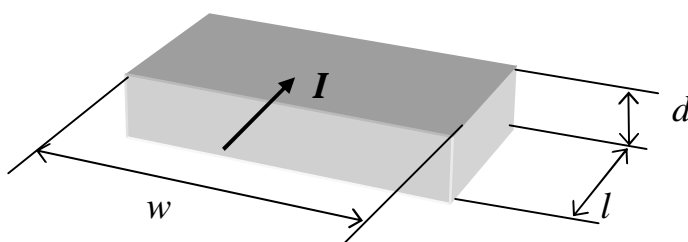


Рис. 1.3. Элемент тонкого поверхностного слоя.

При $w = l$ (квадратный образец), получаем:

$$R_s = \rho_s / d, \text{ Ом/квadrat.} \quad (1.9)$$

Размерность "Ом/квadrat" справедлива при известной толщине слоя d , что было справедливо в технике тонких и толстых плёнок при изготовлении резисторов, микросхем и других компонентов. При анализе свойств поверхности в электростатических задачах эта размерность поверхностного сопротивления в определённой мере дань традициям, поскольку точно значение d определить трудно.

Если для материалов принять толщину слоя равной толщине δ_c скин-слоя, то получим:

$$\delta_c = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu}}, \quad (1.10)$$

где ω – частота сигнала; σ – абсолютная проводимость металла; μ – абсолютная магнитная проницаемость металла.

С учётом (1.10) активная составляющая поверхностного сопротивления равна:

$$R_s = \frac{1}{\sigma_s \delta_s} \quad (1.11)$$

Значение объёмной удельной проводимости и диэлектрической проницаемости может использоваться для прогнозирования скорости нейтрализации заряда за счёт электропроводности большей части материала. На рис. 1.4 показан фрагмент изоляционного материала с проводящим слоем. Заземляющий электрод непосредственно связан с проводящим слоем. Если положительный заряд q поместить на проводящем слое с противоположной стороны от электрода C , то силовые линии электрического поля будут направлены от заряда q к электроду C . Отрицательные заряды, достигая q , нейтрализует его. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость изоляционного материала выше проницаемости воздуха, силовые линии поля будут в основном сосредоточены в изоляционном материале и воздушная среда не вносит существенного вклада в процесс нейтрализации.

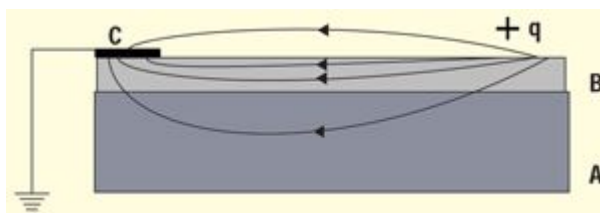


Рис. 1.4. Изоляционный материал (А) с поверхностным проводящим слоем (В).

1.2.4 Улучшение антистатических характеристик диэлектриков

Как мы видим, накоплению статического заряда в диэлектриках препятствует наличие достаточной объёмной, или поверхностной проводимости этих диэлектриков. Поэтому целенаправленное повышение объёмной, или поверхностной проводимости материала способствует приданию ему антистатических свойств.

Поверхностно проводящие изоляторы. Известно, что электростатические проблемы редко возникают в средах с высокой относительной влажностью воздуха, большей, чем 50-60 %. Этот факт иногда ошибочно интерпретировался таким образом, что влажный воздух имеет более высокую проводимость, чем сухой. Это не так. Влажный воздух имеет несколько меньшую проводимость, чем сухой, потому что подвижность малых ионов воздуха слегка уменьшается с увеличением влажности.

Причиной стекания заряда при высокой влажности является образование на поверхности материала плёнки влаги. Эта плёнка содержит электролитические ионы, обладающие достаточно высокой подвижностью и способствующие стоку заряда. В результате увеличенной влажности воздуха увеличивается толщина водяной пленки на всех поверхностях материала, и возрастают антистатические свойства.

Различные материалы требуют различной величины относительной влажности для того, чтобы наблюдалось достаточно высокая скорость стекания заряда. Так, например, материалы, подобные вате, слабо сохраняют заряды уже при относительной влажности 30-35 %, тогда как полимеры, подобные полиамадам, могут рассматриваться как антистатики только при величине относительной влажности 50 % или больше.

Вообще говоря, никакие наведённые заряды не удерживаются в материале, если влажность превышает 60 %. Однако, следует заметить, что влажность такого высокого уровня часто создает практические, технические или гигиенические проблемы, если она поддерживается в течение длительного времени. Так, при высокой относительной влажности могут существенно возрасти отказы в работе полупроводниковых приборов и интегральных схем, герметизированных в пластмассовые корпуса, вследствие проникновения следов воды через корпус.

Повышение поверхностной проводимости изоляторов. Часто возможно выполнить изоляционные материалы, достаточно поверхностно проводящими, даже при относительно низких влажностях, обрабатывая поверхность присадками для снятия статических зарядов. При этом формируется поверхностный слой толщиной в несколько молекул, способствующий адсорбции молекул воды и образованию проводящей поверхностной пленки.

Присадки для снятия статических зарядов, очевидно, должны быть гигроскопичные и обладать низким давлением пара, чтобы предотвращать их быстрое испарение с обработанных поверхностей.

Обработка такого типа называется антистатической и широко используется для тканей и пластмасс. При необходимости производится антистатическая обработка покрытий пола, чтобы уменьшить вероятность статического заряжения персонала при хождении по данному покрытию. В текстильных предприятиях антистатическая обработка покрытий пола обычно эффективна в течение двух-трех месяцев. Для жестких покрытий пола антистатическая обработка должна повторяться практически после каждой мойки.

Постоянные антистатики. В некоторых случаях присадки для снятия статических зарядов могут быть включены в состав полимеров или перед получением полимера (полимеризацией), или в процессе его переработки (например, экструзии). Наиболее известный пример этой методики - изготовление полиэтилена с антистатическими свойствами. В процессе изготовления изделия из полиэтилена методом экструзии (пленка, лотки, полки и т.д.), антистатическая добавка распределяется по поверхности изделия, увеличивая адсорбцию влаги из воздуха и, тем самым, придавая материалу антистатические свойства.

Хотя давление пара большинства антистатических добавок является довольно низким, всегда имеет место некоторое испарение молекул этих добавок с поверхности обработанного материала. В определенной степени это испарение компенсируется диффузией молекул добавки из внутренних областей материала. Однако, такой процесс не может поддерживаться длительное время, и концентрация добавки на поверхности материала уменьшается, что приводит к постепенному увеличению поверхностного сопротивления и постепенной потере антистатических свойств.

Эффективная продолжительность жизни постоянного антистатического материала зависит от многих факторов. Наиболее важным из них являются температура среды и толщина материала, которая (для данной объемной концентрации добавки) определяет возможность диффузии молекул добавки к поверхности. Следует отметить, что диффузия добавки к поверхности, обеспечивая увеличение продолжительности антистатического эффекта, может оказывать нежелательное действие на компоненты электронных устройств, взаимодействуя с ними. Так, в случае печатных плат и других изделий, выполненных на дефектных подложках из поликарбоната, происходит их раскалывание, когда они упакованы в антистатическую тару, содержащую жирные амины.

1.2.5 Заряжение тела человека

Имеются очень немногие случаи, в которых возможно количественно описать электризацию, то есть скорость роста заряда изолированной проводящей системы или увеличение поля изолятора.

Один из таких важнейших случаев – это процесс заряжения тела человека, идущего по изолированному напольному покрытию. Человек является основным носителем электрического заряда, который при определенных условиях приводит к электростатическому разряду. Человек является участником технологического процесса, оператор работает с аппаратурой в процессе эксплуатации, а во время монтажа или ремонта соответствующий специалист имеет доступ к узлам и блока аппаратуры. Во всех

этих случаях имеется опасность поражения аппаратуры электростатическим разрядом, возникающим между человеком и элементами аппаратуры.

Рассмотрим простейшую схему заряжения человека. Эти результаты нельзя рассматривать как точные, но они дают представление о физике процесса и позволяют получить некоторые ориентировочные численные оценки. Схема заряжения человека, идущего по изоляционному напольному покрытию, приведена на рис. 1.5.

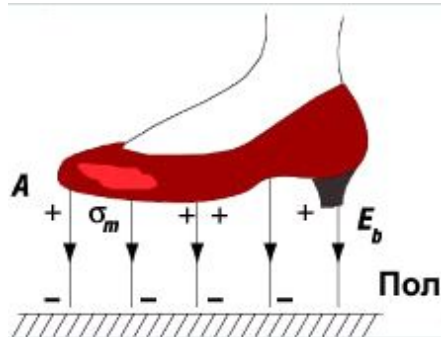


Рис. 1.5. Разделение заряда между подошвой и полом.

Примем, что значение заряда Δq , приобретаемого после каждого шага, определяется условиями контакта и трения между подошвами ботинок человека и покрытием, а скорость идущего человека составляет n шагов в единицу времени. Приближенно это соответствует зарядному току:

$$i_c = n \cdot \Delta q. \quad (1.12)$$

В начальный момент ток заряжает человека так, что напряжение V увеличится со средней скоростью

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{n \cdot \Delta q}{C} \quad (1.13)$$

где C –емкость тела человека, которая составляет 100 – 200 пФ.

Увеличение напряжения ΔV с первым шагом будет

$$\Delta V = \frac{\Delta q}{C}. \quad (1.14)$$

Ток i_d , стекающий по телу человека, определяемый сопротивлением R покрытия, будет равен:

$$i_d = \frac{V}{R}. \quad (1.15)$$

Когда значение тока, стекающего с тела человека, станет равным току заряжения ($i_c = i_d$), наступит стационарное состояние. При этом электрическое напряжение достигнет своего максимального значения, равного:

$$V_m = R \cdot n \cdot \Delta q. \quad (1.16)$$

Если самое высокое напряжение, до которого можно зарядить тело человека, равно $V_{accер}$, то для сопротивления заземления должно выполняться условие:

$$R \leq \frac{V_{accер}}{n \cdot \Delta q_{max}}. \quad (1.17)$$

В выражении (1.17) Δq_{max} - максимальное значение заряда за отделенный шаг. Максимальное значение Δq_{max} может быть оценено как

$$\Delta q_{max} = \varepsilon_0 E_b A. \quad (1.18)$$

Здесь ε_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, E_b - напряженность поля пробоя в воздухе между электродами, составляющая приблизительно $3 \cdot 10^6$ В/м, A - площадь пола, контактирующая с подошвой башмака, и для среднего размера обуви равная примерно 150 см².

Вводя указанные выше значения параметров в (1.18), находим, что

$$\Delta q_{max} \approx 4 \cdot 10^{-7}, \text{ Кл.} \quad (1.19)$$

Предположим, что скорость ходьбы равна 2 шагам в секунду. Тогда, согласно (1.12) зарядный ток для максимального значения заряда, взятого из (1.19), составит:

$$i_{cmax} = n \cdot \Delta q_{max} = 8 \cdot 10^{-7} \approx 10^{-6}, \text{ А.} \quad (1.20)$$

При этом, если $V_{accp} = 100$ В, то из (1.17) получаем, что $R \leq 100$ МОм.

Заметим, что полученное значение сопротивления уже по определению, как это следует из (1.17), представляет собой постоянную величину. Если известно сопротивление изоляционного напольного покрытия, например, 10 ГОм, то это позволяет определить по (1.16) максимальное напряжение, до которого может зарядиться тело человека при ходьбе по этому покрытию:

$$V_{max} = 10 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^{-7} = 8000, \text{ В.}$$

Этого напряжения достаточно для поражения многих полупроводниковых приборов. При увеличении сопротивления изоляции это напряжение растет.

Уравнение (1.14) позволяет грубо оценить ожидаемое увеличение напряжения тела, происходящее при первом шаге, приняв емкость тела человека 200 нФ, а значение Δq – из уравнения (1.19),

$$\Delta V = 4 \cdot 10^{-7} / 200 \cdot 10^{-12} = 2 \cdot 10^3, \text{ В.}$$

Конечно, маловероятно, что вся область подошвы обуви зарядится до уровня напряжения, соответствующего пробоя, и что при ходьбе не будет происходить частичная нейтрализации образующегося заряда. Приняв с учетом сказанного $\Delta q = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл со среднеквадратичным отклонением $0,5 \cdot 10^{-8}$ Кл увеличение напряжения для первого шага составит 150 В. При скорости 2 шага в секунду ожидаемое максимальное напряжение согласно (1.16) составляет:

$$V_m = 10 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-8} = 600 \text{ В.}$$

На рис. 1.7 показано изменение напряжения тела человека при ходьбе по изолированному покрытию как функция времени. Видно, что напряжение достигает максимума $3,5$ кВ после приблизительно 15 секунд и человек не достигает предсказанного максимального значения 6 кВ.

Если человек останавливается через 21 с (рис. 1.6), то начинается процесс разряда через сопротивление заземления. Анализ кривой разряда показывает, что это сопротивление лежит в диапазоне $2 \cdot 10^{10} \dots 2 \cdot 10^{11}$ Ом.

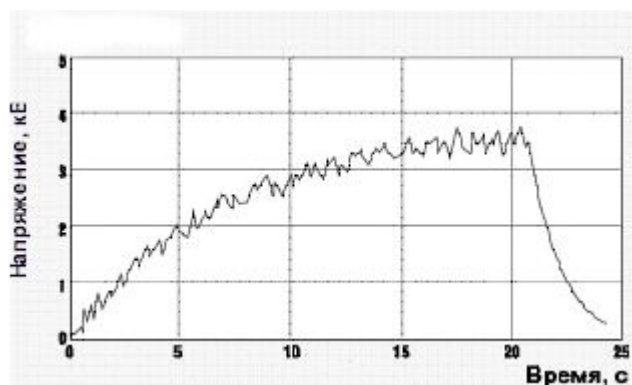


Рис. 1.6. Электрическое напряжение тела человека, идущего по изоляционному (диэлектрическому) покрытию.

Максимальное напряжение V_m получено для человека, идущего по покрытию с сопротивлением R . Напряжение первого шага составляет 150 В и не зависит от сопротивления разряда. Это значение уже может создать определение проблемы для электронной аппаратуры, но не учитывает неизбежный разряд при отрыве ступни от пола. При этом напряжение ΔV на завершающей стадии шага Δt может быть записано как

$$\Delta V = \frac{\Delta q}{C} \cdot \frac{RC}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \right) \quad (1.21)$$

где C – ёмкость ступни.

Если принять некоторые усредненные данные: $\Delta t \approx 0,1\text{ с}$, $C = 100\text{ нФ}$, $n = 2\text{ шага/с}$, $\Delta q = 3 \cdot 10^{-8}\text{ Кл}$, то можно рассчитать ΔV и V_m как функцию сопротивления разряда R (рис. 1.7). Видно, что при малых значениях R значение ΔV больше V_m . Например, при $R = 1\text{ ГОм}$ (10^9 Ом) среднее максимальное напряжение $V_m = 60\text{ В}$, а одношаговое напряжение $\Delta V = 180\text{ В}$. Это, на первый взгляд, необычная ситуация: напряжение в конце одного шага больше, чем при ходьбе. Объяснение заключается в том, что при малых сопротивлениях разряда заряд, накопленный за один шаг, успевает частично стечь до начала следующего шага. Принимая $\Delta t = 0,1\text{ с}$ и $n = 2\text{ шага/с}$, постоянную времени разряда $0,4\text{ с}$, кривые (рис. 1.7) показывают, что при $\Delta V = V_m = 270\text{ В}$ сопротивление разряда $R = 4,5 \cdot 10^9\text{ Ом}$. Таким образом, при $R < 4,5 \cdot 10^9\text{ Ом}$ максимальное напряжение определяется одношаговым напряжением, при $R > 4,5 \cdot 10^9\text{ Ом}$ – интегрированным значением по шагам. Это напряжение растёт пропорционально сопротивлению разряда.

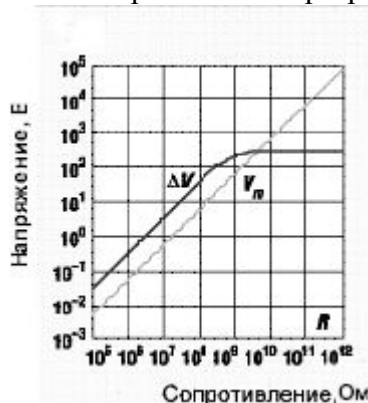


Рис. 1.7. Максимальное напряжение V_m и одношаговое напряжение ΔV как функция R .

Следует иметь в виду, что увеличению заряда способствует использование кресел с синтетическим покрытием, езда в автомобиле и трение одежды о сидение автомобиля и другие факторы. Всё это может привести к внезапному повышению напряжения.

1.2.6 Приложения статического электричества

Статическое электричество имеет много приложений, которые используют электростатические свойства материалов.

Электрофильтр

Возможно наиболее важное устройство, основанное на принципах электростатики - является электростатический фильтр (или просто, электрофильтр) без которого, например, было бы невозможно создавать чистые помещения в полупроводниковом производстве.

В электрофильтре (рис. 1.8) воздух проходит через область, где ионы воздуха генерируются коронным разрядом. Некоторые из ионов подсоединятся к частицам в проходящем воздухе. Этот воздух проходит электрическое поле, где частицы могут осажаться на одном из электродов.

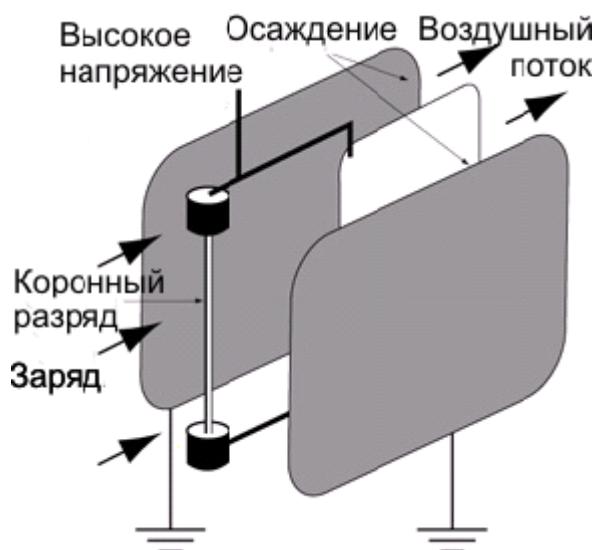


Рис. 1.8. Принцип работы электрофильтра.

Осаждается ли материальная точка фактически на электроде коллектора, зависит от силы воздушного потока, напряженности поля, заряда и массы частицы. Очевидно, чем больше по габаритам и более тяжелая материальная точка, тем более трудно будет извлечь её из воздушного потока. С другой стороны, чем больше материальная точка, тем большее количество ионов может подсоединять к ней, производя большую отклоняющую силу. Электрофильтр не следует путать с электростатическим фильтром, где электрическая часть фильтрации зависит, прежде всего, от сил поляризации.

Окраска распылением

Другое важное применение электростатических принципов - окраска распылением.

Если жидкость разбрызгивается из заземленного распылителя, некоторые из сформированных капелек, вероятно, зарядятся, но не предсказуемым способом.

Если инжектор находится под напряжением, например, положительным как показано на рис. 1.9, капельки оставят инжектор с положительным зарядом. Заряд будет также пропорционален размеру капельки. Если заземленный проводящий объект помещен перед инжектором, капельки будут отклонены к объекту из-за поля от инжектора.

Регулируя скорость воздушного потока и напряжение инжектора, можно гарантировать, что фактически все капельки осядут на объект.

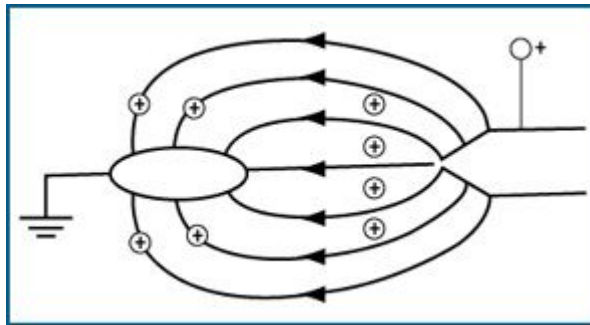


Рис. 1.9. Принцип электростатической окраски.

Очевидно, часть детали, обращённая к инжектору, получит максимальную окраску. Однако, путем поворота объекта, можно сделать покрытие очень равномерным. Это только один из ряда методов обработки поверхности, использующих электростатику.

Заряжение жидкостей

Вопросы заряжения жидкостей могут быть актуальны при рассмотрении вопросов проектирования системы охлаждения электронных средств, особенно мощных источников питания. Предположим, что жидкость течет с объемным расходом u ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$), имеет удельную массу ρ ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$) и удельную плотность распределения заряда μ (кг^{-1}). Поток составляет ток $i_c = u\rho\mu$, Кл. Жидкость собрана в проводящий, полуизолированный контейнер (рис. 1.10) с сопротивлением R и емкостью C . Напряжение контейнера увеличится до максимального значения V_m . Для $V_m = i_c R = u\rho\mu R$ сохранённая энергия приближается к максимальному значению W_m

$$W_m = \frac{1}{2} C (u\rho\mu R)^2.$$

Примем $u = 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (1 литр в с), $\rho = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\mu = 10^{-6} \cdot \text{кг}^{-1}$, $R = 10^{10} \text{ Ом}$, и $C = 200 \text{ нФ}$, тогда получим: $i_c = 10^{-6} \text{ А} = 1 \text{ мкА}$, $V_m = 10^4 \text{ В}$ и $W_m = 10^{-2} \text{ Дж} = 10 \text{ мДж}$.

Максимальные значения напряжения практически будут достигнуты за 10 с.

Отметим, что жидкость должна иметь объемное удельное сопротивление выше, чем $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для того, чтобы её заряд был ощутимый. Это означает, что вода не может заряжать при распылении, но, вероятно, все жидкости могут заряжаться.

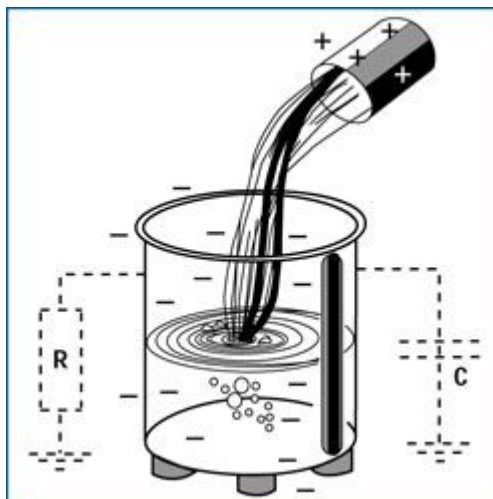


Рис. 1.10. Жидкость в проводящем полуизолированном контейнере, заземленном через сопротивление R и емкость C .

Заряжение газов

Здесь все можно свести к одной фразе: *газы не заряжаются!*

Аккумуляирование зарядов

Случайные электростатические заряды могут накапливаться только на телах, изолированных по отношению друг к другу и к земле. Если это условие не соблюдается, заряды стекают или рассредоточиваются сразу после образования.

Уровень электростатического заряда зависит, главным образом, от следующих параметров: от **скорости образования** заряда и **сопротивления распространению** заряда.

Существенными являются также следующие два параметра: скорость разделения тел и проводимость их материалов.

Накопленная потенциальная энергия зависит от емкостной характеристики системы, которая в свою очередь зависит от размеров предметов и от расстояния между ними. Доля накопленной энергии в некоторых случаях ограничивается разностью потенциалов при разъединении, вызывающей искровой разряд и, следовательно, освобождение энергии. Большинство элементов различных устройств имеют емкость 100 - 1000 пФ. Емкость человеческого тела по отношению к земле составляет около 200 пФ, но она является переменной величиной, зависящей от каждого конкретного человека.

Обобщенная расчетная формула для энергии заряда:

$$W = \frac{1}{2}(CU^2). \quad (1.22)$$

Значение заряда увеличивается с улучшением контакта при полировке поверхности, с увеличением давления и с увеличением разности диэлектрических постоянных контактирующих тел. Аккумуляирование заряда зависит также от формы объекта и бывает значительным в окрестности минимального радиуса кривизны.

1.2.7 Измерение электростатических зарядов

Характерным для статического электричества является то, что скопление зарядов чаще всего наблюдается на диэлектриках, при этом энергия электрического поля зарядов статического электричества невелика. Это исключает возможность непосредственного подключения приборов к наэлектризованным объектам.

Несмотря на применение различных мер по предупреждению образования электростатических зарядов, их появления невозможно полностью избежать. При исследовании конкретного помещения с точки зрения защиты от ЭСР желательно получить данные об электростатической обстановке. Используя различные расчетные модели можно только примерно описать реальное состояние дел. Причина этого в том, что возникновение ЭСЗ и их разряд зависят от очень многих факторов, не все из которых можно учесть при расчетах. Тем более, что значение заряда существенно зависит от малейших изменений окружающей среды. Для составления полной картины электростатической обстановки применяют различные приборы для измерения статического электричества. Такой контроль проводится при контроле параметров средств защиты от статического электричества при производстве и в других случаях.

Приборы для измерения электростатического заряда и создаваемого ими электрического поля имеют ряд специфических особенностей. Поэтому при измерениях к ним предъявляются следующие требования:

- минимальное потребление энергии от наэлектризованного объекта;
- большое входное сопротивление приборов, использующих явление электрической индукции для измерения потенциала на известной емкости (не менее 10^{12} Ом);

- малое входное сопротивление приборов, используемых для измерения токов электризации в непрерывных процессах. Это позволяет снизить требования к сопротивлению изоляции объекта и повысить точность измерений.

По своему назначению такие приборы подразделяются на:

- приборы для измерения потенциалов статического электричества;
- приборы для измерения напряженности поля, создаваемого зарядами;
- приборы для измерения токов электризации;
- приборы для измерения поверхностной плотности зарядов.

Конструкции преобразователей приборов и их источников питания должны исключить дополнительное образование ЭСЗ, которые могут повлиять на измерения и на оборудование.

В настоящее время многие фирмы выпускают целые комплексы измерительного оборудования, которые могут точно определить места образования статических зарядов и их значение.

В качестве примера можно привести электростатический вольтметр, выпускаемый фирмой **Electro-Tech Systems**. Он представляет собой точный инструмент для бесконтактного измерения величины и полярности электростатических полей и рекомендуется к применению, как в лабораторных, так и в промышленных условиях для нахождения и измерения статических зарядов. Существует его малогабаритная модификация, предназначенная для бесконтактного определения местоположения и измерения значения и полярности электростатического поля. Диапазон измеряемых напряжений 0...5 кВ. Эта же фирма выпускает нанокулонметр - точный прибор для измерения зарядов величиной 0...2000 Кл.

Поверхностную плотность зарядов определяют индукционным методом по разности потенциалов, которая возникает в электроде, представляющем собой проводник, в процессе его перемещения в поле этих зарядов.

1.3 Разряд электростатического заряда

1.3.1 Механизмы разряда

На практике далеко не всегда можно предотвратить образование статических зарядов, но возможно с помощью определенных методов обеспечить их разряд. Важную роль при осуществлении разрядов играет относительная влажность воздуха. Она повышает поверхностную проводимость, а во многих случаях и объемную проводимость материалов и, тем самым, способствует протеканию разряда.

Можно выделить следующие механизмы разряда: стекание заряда за счёт объёмной проводимости, стекание заряда за счёт поверхностной проводимости и, наконец, пробой, как частный случай объёмной проводимости.

Газам присущ механизм разряда, связанный с объёмной проводимостью. Здесь частными случаями, имеющими большое значение при разряде статического электричества, являются частичный или коронный разряд и пробой.

Твердые диэлектрики обычно имеют дефекты, связанные с наличием примесей, и погрешностями производства, а также с неоднородностью строения. Все это приводит к появлению в таких материалах свободных носителей зарядов и, следовательно, обуславливает возможность стекания статического заряда за счёт объёмной проводимости.

Возможность осуществления стока заряда за счёт поверхностной проводимости определяется характером поверхности материала (шероховатостью), а также её химическим составом, например, содержанием различных оксидов, наличием покрытий, содержанием примесей и её влажностью.

В случае *однородного* электрического поля внутри материала при превышении его электрической прочности происходит *пробой*. Электрическая прочность материала измеряется в В/м и для газов в определенной степени зависит от давления. При электрическом пробое вокруг электродов образуется плазменный канал.

В *неоднородном* поле можно заметить мощные электрические разряды при гораздо меньшем напряжении, чем необходимо для полного электрического пробоя. Это явление называется *частичным* или *коронным разрядом*.

Когда предмет, обладающий зарядом статического электричества, является проводником, обычным видом такого заряда является пробой в воздухе. В этом случае разряд обычно происходит в виде одной искры.

1.3.2 Пробивная напряженность поля и напряжение пробоя

На рис. 1.11 условно показаны средние длины пробега электрона λ_e и отрицательного иона воздуха λ_i . Максимум энергии $\Delta W_{max,e}$, которая может быть достигнута электроном, составляет:

$$\Delta W_{max,e} = e \cdot E \cdot \lambda_e. \quad (1.23)$$

Соответствующая энергия для тока ионов

$$\Delta W_{max,i} = e \cdot E \cdot \lambda_i \quad (1.24)$$

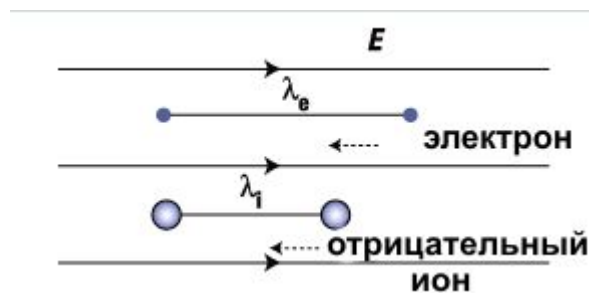


Рис. 1.11. Средние длины свободного пробега электрона и отрицательного иона воздуха (в относительном масштабе).

Для ионизации молекулы воздуха требуется энергия W_{ion} . Средние свободные пробеги в атмосферном воздухе при нормальном атмосферном давлении составляет для электрона $\lambda_e \approx 10^{-5}$ м, а для иона $\lambda_i \approx 10^{-7}$ м. Если обозначить пробивную напряжённость поля как E_d , то при этом энергии электрона и иона будут равны соответственно

$$W_e = e \cdot E_d \cdot \lambda_e \quad (1.25)$$

$$W_{ion} = e \cdot E_d \cdot \lambda_i \quad (1.26)$$

Энергия иона на два порядка меньше, чем энергия электрона и составляет $W_{ion} = 5 \cdot 10^{-18}$ Дж для воздуха, то из уравнения (1.26) получаем:

$$E_d = \frac{W_{ion}}{e \cdot \lambda_i}; \quad E_d = \frac{5 \cdot 10^{-18}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-7}} = 3 \cdot 10^8, \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}. \quad (1.27)$$

Частичный или коронный разряд можно ускорить, если в предмете, в котором образуется заряд, или в другом заземленном предмете, расположенном поблизости от него, сделать острые углы или наконечники. Наличие острых углов в деталях и узлах электронной аппаратуры создает концентрацию электрического поля и способствует возникновению электростатического разряда именно в этом месте. Поэтому их следует избегать при разработке изделия.

Коронный разряд не происходит, если напряжение не превышает определенного порогового уровня. Это напряжение зависит от остроты наконечника, а при использовании провода - от его диаметра. Чем острее наконечник и чем тоньше провод, тем ниже пороговое напряжение. Нижняя граница напряжения может определяться неидеальной формой острия наконечника, связанной с микроструктурой материала, а также тем обстоятельством, что по мере протекания электрических разрядов, острие наконечника закругляется. Нижней границей порогового напряжения на острие наконечника является значение потенциала около 3 кВ , а на проводе - несколько выше.

Хотя в результате коронного разряда статический заряд полностью не разряжается, этот разряд позволяет ограничивать возникающие напряжения и во многих случаях предотвращать электрические пробой.

Заряженное тело может терять заряд двумя механизмами. Если тело – *проводник*, то соединение с землёй обеспечивает условия стекания заряда. При этом в системе заземления или поверхностном слое антистатика протекает ток. Если заряженный корпус - истинный *изолятор*, разряд может происходить, если тело полностью окружено проводящей жидкостью или ионизированным воздухом. На самом деле в этом случае тело не теряет свой заряд. Он *нейтрализуется* противоположно заряженным ионам жидкости. Это называется *спадом заряда*.

Ток спада управляется полем заряда, который будет нейтрализован. Единственный результат тока разряда (кроме нейтрализации) - рассеяние теплоты согласно закону Джоуля.

Другой механизм, при котором тело может "терять" свой заряд, полностью или частично, является *электростатический разряд*. Разряд происходит, если поле от заряда достаточной интенсивности, чтобы вызвать ионизацию в окружающей среде. Различие между нейтрализацией и разрядом - прежде всего в том, что в разряде принимают участие носители заряда, созданные полем, и результаты могут быть намного более драматичны, чем при стекании зарядов.

1.3.3 Разновидности электрических разрядов

Электрические разряды обычно делятся на три типа: *коронный* разряд, *искровой* разряд и *кистевые* электрические разряды.

Если напряженность поля перед заострённой точкой проводника превышает напряженность поля пробоя для данной среды (например, воздуха), то будет происходить **коронный разряд**. Это произойдёт, если проводник с острыми выступами будет находиться под высоким напряжением, причём напряжение пробоя будет зависеть от геометрических условий. Но коронный разряд может также происходить, если заземленный, заострённый проводник с нулевым напряжением расположен около заряженного объекта, обладающего статическим зарядом. Это показывает, что для того, чтобы произошёл разряд, **не требуется обязательного наличия высокого напряжения, а необходима только высокая напряженность поля** (рис.1.12).

В коронном разряде, ионизация ограничена малой областью вокруг электрода, где превышена напряженность поля пробоя. В остальной части поля, имеется только ток медленных ионов и медленное перемещение заряженных частиц, находящихся путь на соответствующий встречный электрод.

Коронный разряд часто называют тихим “электрическим разрядом”. Он может поддерживаться, пока в некоторой области напряженность поля превышает напряженность поля пробоя, то есть пока напряжение электрода или напряженность заряда диэлектрика достаточно высока.

Искровой разряд может происходить между двумя округлыми проводниками, имеющими различные потенциалы. Один из проводников обычно заземлен (рис. 1.13). Разряд начинается в окрестностях точки, где напряженность превышает напряженность

поля пробоя. Но в отличие от коронного разряда, в искровом разряде ионизация между этими двумя электродами происходит полностью.



Рис. 1.12. Коронный разряд.



Рис. 1.13. Искровой разряд.

Если электроды соединены с источником напряжения, разряд может превратиться в непрерывную дугу, но в нормальном случае искровой разряд от изолированного проводника очень быстро рассеивает энергию. Эта энергия рассеивается в небольшой области разряда. Она может быть рассчитана по уравнению:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

где C – ёмкость между электродами, V – разность их потенциалов.



Рис. 1.14. Кистевой разряд.

При **кистевом разряде** форма коронного разряда по внешнему виду напоминает кисть (рис. 1.15). Он наблюдается у электродов с острыми выступами в воздухе при давлении около атмосферного и выше. Между коронным и искровым разрядами существует различие: кистевой разряд, который может происходить, например, между заряженным материалом и обычно заземленным электродом с радиусом кривизны несколько миллиметров. Если кистевой разряд поддерживается в течение более длительного промежутка времени, то это может рассматриваться как неправильное люминесцентное свечение.

Почти все разряды от изоляторов - кистевые разряды.

1.3.4 Воспламеняемость и ЭСР

Одна из опасностей ЭСР при эксплуатации и изготовлении технических средств характеризуется различной способностью к воспламеняемости — то есть способности разряда вызвать возгорание или ожог. Если мы имеем смесь, например, кислорода и диэтилового простого эфира ($C_2H_5)_2O$), то молекулы компонентов могут реагировать друг с другом, формируя воду и углекислый газ. Для того чтобы могло произойти возгорание, некоторое количество энергии должно быть доставлено в достаточно малый объем в достаточно короткое время. Количество энергии строго зависит от газообразной смеси компонентов и их относительной концентрации.

На рис. 1.15 даны энергии воспламенения для диэтилового пара простого эфира, смешанного с или чистым кислородом или с атмосферным воздухом. Для концентрации пара приблизительно 16 % эфира в чистом кислороде, требуется только приблизительно 1

мкДж, чтобы индуцировать вспышку. Для пара эфира в атмосферном воздухе, минимальная энергия воспламенения - приблизительно 0,2 мДж для концентрации эфира 6 %.

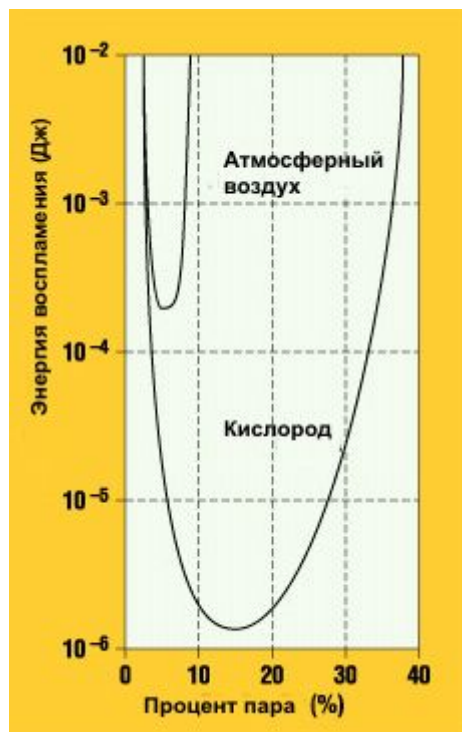


Рис. 1.15. Энергия воспламенения смесей диэтилового (простого) эфира с кислородом

Хотя на рис. 1.15 приведены кривые для диэтилового (простого) эфира, они справедливы для паров многих органических соединений, как алифатических, так и циклических. Поэтому значение 0,2 мДж может быть расценено как предел с более низкой энергией для паровоздушных смесей. Может ли электростатический заряд вызывать зажигание в данной среде, зависит от того, может ли разряд доставлять энергии больше чем 0,2 мДж (или соответствующая удельная величина) в объеме "достаточно малом" и в достаточно короткое время.

Рассмотренные выше типы разрядов отличаются различной воспламеняющей способностью. Скорость и энергия, рассеяния в **коронных разрядах** всегда слишком низка, чтобы инициализировать воспламенение — другими словами, они **не воспламеняющие при любых обстоятельствах**.

В **кистевых разрядах**, полная энергия легко может быть достаточно высока, но в большинстве случаев или скорость, или энергия слишком низки, чтобы вызвать воспламенение. Тем не менее, возможно создать такой заряд и условия, что кистевой разряд может вызывать зажигание в смеси общих штатных паров и атмосферного воздуха. Но следует подчеркнуть, что такие условия очень редки, если когда-либо встречаются случайно. Поэтому, мы можем заключить, что **кистевые разряды от изоляторов имеют очень низкую воспламеняющую способность**.

Совершенно иная ситуация с **искровым разрядом**. Почти вся энергия разряда будет быстро рассеяна в узком объеме разряда. Если разряд происходит во взрывоопасной атмосфере, **может последовать её воспламенение**.

В качестве примера рассмотрим некоторую условную ситуацию. Женщина-оператор, ёмкость тела которой приблизительно 200 нФ, идёт по изолированному напольному покрытию или снимает свитер (а может быть делает и то, и другое одновременно), заряжаясь при этом до напряжения около 2000 В, что определяет энергию 0,4 мДж. Если она начинает удалять лак с ногтей, используя ацетоновый растворитель, который имеет минимальную энергию воспламенения 0,2 мДж в атмосферном воздухе, и при этом коснётся заземлённых частей компьютера, то ЭСР возможно вызовет воспламенение смеси. В реальной ситуации воспламенение вряд ли произойдёт.

Если обратиться к рис. 1.15, видно, что кривая, соответствующая атмосферному воздуху, ограничивает очень узкую область. Это означает что, малейшие изменения процентного соотношения компонентов наиболее легко воспламеняемой смеси (простой эфир 6 %), необходимая для воспламенения энергия существенно повышается. Поэтому вероятность возгорания паров ацетона от искры с энергией 0,2 мДж весьма мала.

С другой стороны, где-нибудь между областями с большой и малой концентрацией ацетона существует область с наиболее летучей энергозависимой смесью. Если искровой разряд произойдет именно в этой области, то воспламенение смеси возможно.

Безопасное напряжение воспламенения. Принято считать, что электрический разряд, распространяющий энергию меньше, чем минимальная энергия воспламенения $W_{\min} \approx 0,2 \text{ мДж}$ в атмосферном воздухе, не является воспламеняющим, независимо от того, какие взрывчатые пары присутствуют. Безопасное напряжение воспламенения определяется как

$$V_{ex} = \sqrt{\frac{2W_{\min}}{C}}, \text{ В.} \quad (1.28)$$

Для $W_{\min} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ и емкости тела человека $C = 200 \text{ нФ}$ получаем $V_{ex} = 1400 \text{ В}$.

Понятие безопасного уровня напряжения относится только к рискам воспламенения. Это понятие не может быть применено к изоляторам, потому что изоляторы не могут находиться под напряжением.

1.4 Влажность и ее влияние

Влажность окружающего воздуха существенно влияет на условия накопления зарядов и условия протекания электростатического разряда. В общем случае при повышении влажности воздуха уровни статических напряжений снижаются. Но при искусственном повышении влажности воздуха ухудшаются условия эксплуатации электронного оборудования, и в большей степени проявляется склонность к коррозии незащищенных металлических поверхностей. В ряде случаев это может служить ограничением для повышения относительной влажности. Кроме этого, повышения влажности воздуха может отрицательно сказаться на условиях работы персонала обслуживающего электронные системы или работающего с электронными средствами.

Повышенная относительная влажность воздуха – более 30 % - снижает сопротивление большинства диэлектриков, в результате чего увеличивается ток, текущий в противоположном от тока поляризации, направлении. При трибоэлектрическом заряде снижается точка равновесия между токами заряда и разряда, что приводит к уменьшению потенциала заряда. Поскольку снижается потенциал, то вероятность разряда уменьшается, а если он происходит, то время его нарастания увеличивается. При этом спектр разряда смещается в область более низких частот и облегчается защита аппаратуры.

В обычных условиях наличие пыли на диэлектрических поверхностях (покрытия пола, изоляционные маты, покрытия рабочих столов, тара и т.п.) при наличии влажности приводит к появлению тонкой поверхностной пленки с неопределенной проводимостью (как правило, менее 10^{-9} Ом/кв.дм). Если влажность уменьшается, то это явление сводится на нет.

Воздух, окружающий аппаратуру, является неотъемлемой частью структуры образования электростатического заряда, и следует учитывать реальные условия производства и эксплуатации аппаратуры, которые могут значительно изменяться при включении кондиционеров, вентиляторов, обогревателей.

В табл. 1.1 приведены данные, показывающие влияние относительной влажности воздуха на уровень статического заряда при различных действиях, приводящих к трибоэлектрическому заряду [].

Таблица 1.3.

Трибоэлектрический заряд и относительная влажность

Вид активности	Статическое напряжение	
	Относительная	Относительная

	влажность 20 %	влажность 80 %
Хожжение по виниловому покрытию	12 кВ	250 В
Хожжение по синтетическому напольному покрытию	35 кВ	1,5 кВ
Вытаскивание компонента из полиэтиленового пакета	20 кВ	600 В
Скольжение пластмассового короба по напольному покрытию	18 кВ	1,5 кВ
Удаление защитной синтетической пленки с печатной платы	12 кВ	1,5 кВ
Отвод вакуумного паяльника	8 кВ	1 кВ
Аэрозольная очистка монтажа	15 кВ	5 кВ

Относительная влажность должна обязательно рассматриваться совместно с температурой окружающей среды, поскольку это взаимосвязанные факторы.

1.5 Нейтрализация зарядов

Для того чтобы происходила нейтрализация, заряженная область должна быть в контакте со средой, содержащей носители заряда противоположного знака. Поле заряженной области действует на эти носители заряда, и, если они имеют некоторую подвижность, то, в конечном счете, переместятся к заряженной области. Поле от перемещенных зарядов накладывается на поле заряженной области, приводя к устойчиво уменьшающемуся интегральному полю. В результате происходит *нейтрализация* статического заряда.

Удобнее рассматривать отдельно *объемную нейтрализацию* заряда, при которой происходит перемещение электрических носителей сквозь внутреннюю область материала, и *поверхностную нейтрализацию* заряда, происходящую, прежде всего в поверхностном слое материала. В первом случае в результате стекания заряда имеет место объемная проводимость, а во втором случае наблюдается поверхностная проводимость.

1.5.1 Нейтрализация заряда, связанная с объемной проводимостью

Скорость, с которой нейтрализация заряда происходит в некотором поле, зависит от проводимости γ среды. Поле E вызывает ток с плотностью j :

$$j = \gamma \cdot E \quad (1.29)$$

Уравнение (1.29) часто записывается в следующем виде

$$E = \rho \cdot j, \quad (1.30)$$

где

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad (1.31)$$

является объемным удельным сопротивлением среды.

Уравнения (1.29) и (1.30) представляют собой закон Ома. Поле от данной заряженной области будет всегда пропорционально значению заряда, но коэффициент пропорциональности зависит от геометрии и диэлектрических свойств тела и его окружения.

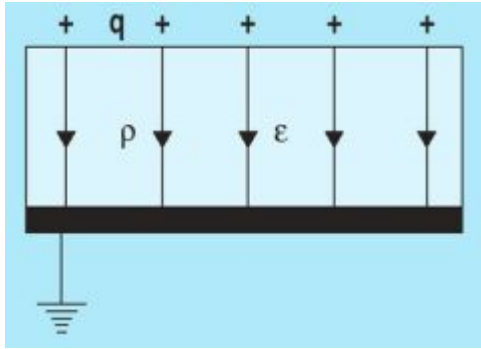


Рис. 1.16. Стеkanie заряда.

Рассмотрим пример, в котором пластина из материала с удельным сопротивлением ρ и абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ опирается на заземленную плоскость (рис. 1.16). Заряд q равномерно распределен на поверхности пластины. Будем считать, что расстояние до других заземленных объектов намного больше, чем размеры заряженного образца. Тогда поверхностная плотность заряда σ связана с напряженностью электрического поля в материале соотношением:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}. \quad (1.32)$$

С учетом уравнения (1.30) это вызовет ток

$$j = \frac{\sigma}{\epsilon\rho}. \quad (1.33)$$

Но плотность тока j определяется скоростью изменения поверхностной плотности зарядов. С учетом этого можно получить выражение для определения поверхностной плотности зарядов при их стекании:

$$\sigma = \sigma_0 \epsilon^{-\frac{t}{\epsilon\rho}}, \quad (1.34)$$

где σ_0 - начальное значение поверхностной плотности зарядов.

Видно, что при стекании заряда его поверхностная плотность экспоненциально уменьшается во времени, причем постоянная времени равна:

$$\tau_0 = \epsilon\rho. \quad (1.35)$$

Уравнение (1.35) корректно при условии, что поле от заряда, нейтрализация которого имеет место, проходит исключительно сквозь среду с удельным сопротивлением ρ и диэлектрической проницаемостью ϵ .

В рассматриваемом случае представляется важным, что *скорость стекания заряда* определяется не только *удельным сопротивлением*, но также и *диэлектрической проницаемостью* материала. Так заряд, находящийся в образце органического стекла (полиметилметакрилата) с $\rho = 10^{13}$ Ом·м и $\epsilon_r \approx 3,4$, нейтрализуется с постоянной времени приблизительно 300 с. Если будет взят образец с тем же самым удельным сопротивлением как и у полиметилметакрилата, но с удвоенной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r \approx 6,8$), скорость стекания заряда будет в два раза меньше, чем у полиметилметакрилата ($\tau_0 \approx 600$ с).

Ситуация со стеканием заряда усложняется, если поле заряда распространяется через несколько диэлектриков с различными проводимостями и диэлектрическими проницаемостями. В этом случае электрический поток Φ_E сквозь поверхность S определяется как

$$\Phi_E = \int_S E \cdot dS.$$

Если поверхность S представляет собой замкнутую поверхность, окружающую заряд q , то, принимая во внимание, что диэлектрическая проницаемость на всем протяжении поверхности S одинакова, рассматриваемое уравнение превращается в следующее:

$$\Phi_E = \int_S E \cdot dS = \frac{q}{\epsilon}.$$

Это - *теорема Гаусса*, которая допускает вычисление поля от различных распределений заряда.

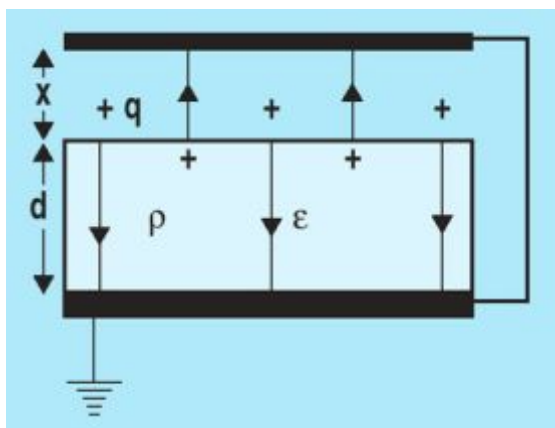


Рис. 1.17. Стеkanie заряда в кусочно-однородной среде.

Рассмотрим более сложную ситуацию, когда параллельно образцу толщиной d , с диэлектрической проницаемостью ϵ и удельным сопротивлением ρ , опирающемуся на заземленную плоскость, помещена другая заземленная плоскость на расстоянии x (рис. 1.17). Предположим, что образец представляет собой органическое стекло (полиметилметакрилат), и что пространство вокруг образца является воздухом с $\epsilon = \epsilon_0$ и $\rho \approx \infty$. Электрический поток от заряда теперь разделен между органическим стеклом и воздухом таким образом, что поверхностный потенциал точки на заряженной поверхности является тем же самым, рассчитан ли он как напряженность поля в воздухе, умноженная на x , или как напряженность поля в диэлектрике, умноженная на d .

Заряд, как ожидается, снова будет стекать по экспоненте, но теперь постоянная времени составит:

$$\tau'_0 = \tau_0 \left(1 + \frac{d}{\epsilon_r x} \right). \quad (1.36)$$

Если, например, принять $d = 0,01$ м и $x = 0,003$ м при относительной диэлектрической проницаемости полиметилметакрилата $\epsilon_r = 3,4$, то получим $\tau'_0 = 594$ с (значение τ_0 дано в (1.35)). Таким образом, требуется примерно вдвое больше времени для стекания заряда с того же образца материала, но находящегося вблизи другого заземленного проводника.

Пример, показанный на рис. 1.17, представляет собой весьма упрощенный случай, и часто не имеется возможности предсказать значение постоянной времени стекания заряда для данного образца в заданной геометрической среде.

1.5.2 Нейтрализация заряда, связанная с поверхностной проводимостью

В этом случае нейтрализация происходит в тонком слое *на поверхности материала*. Это может быть материал, обработанный специальной присадкой для снятия статических зарядов, или диэлектрик с нанесённым на его поверхность проводящим слоем. В любом из этих вариантов ток нейтрализации будет протекать только в поверхностном слое, если его проводимость будет гораздо выше объемной проводимости диэлектрика, содержащего статический заряд.

Однако часть зарядов будет протекать в смежном слое, находящемся между диэлектриком и проводящим поверхностным слоем. В этом случае поле в проводящем слое будет зависеть от диэлектрической проницаемости смежного слоя. *Таким образом, скорость стекания заряда за счёт поверхностного проводящего слоя (постоянная времени стекания) будет зависеть не только от параметров этого слоя, но также и от параметров смежного слоя.*

Обычно процессы в тонких слоях описываются с помощью уравнения

$$E_s = \rho_s j_s, \quad (1.37)$$

содержащего значение поверхностного удельного сопротивления ρ_s . В этой постановке закон Ома требует, чтобы поле E_s на поверхности, обладающей удельным поверхностным сопротивлением ρ_s , вызывало ток с линейной плотностью j_s (линейная плотность тока – это значение тока на единицу длины, $A \cdot m^{-1}$) в проводящем слое.

Если при рассмотрении объемной проводимости было возможно в некоторых упрощенных случаях (см. рис. 1.16 и 1.17) найти связь между удельным объемным сопротивлением и скоростью, с которой нейтрализуется заряд, то в случае поверхностной проводимости сделать это оказалось не так просто. Даже, если удастся измерить удельное поверхностное сопротивление проводящего слоя и узнать его диэлектрическую проницаемость, теоретически нельзя предсказать примерное значение постоянной времени поверхностного стекания заряда, потому что не известно, как электрический поток распределен между проводящим слоем и средой.

1.5.3 Расчетная модель электростатических помех

Практический опыт подтверждает, что по настоящему важным параметром при анализе воздействия ЭСР на аппаратуру является ток разряда. Теории, согласно которым длина дуги (и соответственно электрическое поле рядом с ней) играет определяющую роль в появлении помех, находятся в противоречии со следующими фактами: емкость, напряжение (т.е. длина дуги) и т.п. параметры получены при испытаниях с наименьшим внутренним сопротивлением и отвечают самым жестким условиям. Испытание, которое считается самым строгим, отвечает условиям, когда дуга практически отсутствует, поскольку разряд происходит при прямом контакте с щупом моделирующего устройства, без искрения.

Роль дуги проявляется в том, что скорость пробоя воздушной прослойки влияет на время нарастания тока. Но дуга не является главным показателем процесса, о чем говорят следующие наблюдения: помехи возникают внутри оборудования в виде сильного электромагнитного поля вблизи канала тока, а это поле, в свою очередь, создает переходный процесс в кабелях и печатных платах.

Излучающей антенной является тело человека, его рука, дуга (длина которой сравнительно мала), шасси, а обратную цепь образует плоскость пола. Поскольку речь идет о достаточно протяженном и “размытом” пути тока, его не имеет смысла представлять в виде точечного источника. Точный расчет в этом случае должен проводиться с использованием численных методов с целью определения линий тока.

В первом приближении путь тока I вдоль корпуса может быть уподоблен бесконечно длинному проводнику. В этих условиях напряженность магнитного поля рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{I}{2\pi r}, A/m, \quad (1.38)$$

а индукция:

$$B = \frac{2\mu_r I}{r} 10^{-7}, Tл, \quad (1.39)$$

где: r - расстояние от проводника до точки, в которой определяются B и H .

Несмотря на то, что оценки по выражениям (1.38) и (1.39) носят достаточно грубый характер, эта модель дает результаты, достаточно хорошо согласующиеся с измерениями внутри корпусов приборов с помощью миниатюрных зондов.

Исходя из приведенных формул, напряжение e , наведенное в контуре цепи, возмущенной магнитным полем (плоскость контура нормальна вектору \mathbf{H}), подсчитывается путем дифференцирования потока ψ по времени:

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S, B, \quad (1.40)$$

где S - площадь контура, m^2 .

Рассмотрим простейший пример. Определим наведенную эдс в контуре, площадью S , равной 10 см^2 . Контур расположен на расстоянии (по оси) l , равном 20 мм , от оси тока. Ток достигает 5 А при ЭСР, длительностью 1 нс . Расчетная схема представлена на рис. 1.18.

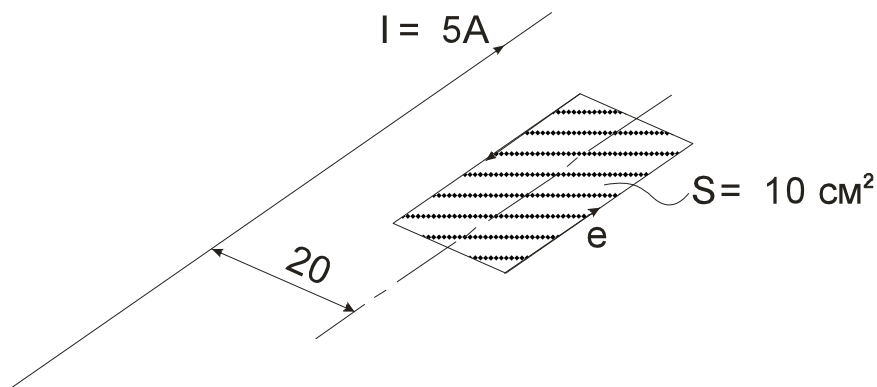


Рис. 1.18. Схема для расчета наведенной эдс.

Вычислим магнитную индукцию по выражению (1.39). Учитывая, что рассматривается воздушная среда, принимаем $\mu_r = 1$. Тогда

$$B = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-7} / 0,02 = 5 \cdot 10^{-5}, \text{ Тл.}$$

Наведенная эдс в контуре рассчитывается по выражению (1.40):

$$e = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 10^{-9}} 10 \cdot 10^{-4} = 50, \text{ В.}$$

Это значение намного превосходит чувствительность современных логических схем к помехам. Но, поскольку наведенные напряжения очень кратковременны, необходимо учитывать реальную динамическую помехоустойчивость используемых логических схем к коротким импульсам. Например, стандартная классическая ТТЛ схема не может быть нормально переключена сигналом с длительностью меньше 10 нс . Такой импульс способен к активизации микросхемы только при достаточно большой амплитуде (необходимо выделить мощность в несколько нДж). При повышении быстродействия цифровых интегральных микросхем (ИМС) этот порог снижается.

Можно сравнить спектр импульса ЭСР с полосой пропускания различных схем. При этом необходимо отметить, что форма помех, наведенных этим излучением, может отличаться от формы импульса разрядного тока. Кроме того надо иметь ввиду, что свыше определенного уровня ($30 - 50 \text{ В}$ для некоторых схем) достигается порог необратимого ухудшения качества работы.

Полярность напряжения, как и направление разрядного тока, не имеет большого значения. В случае, когда помеха возникает на входе логической схемы, направление входного тока задается направлением поля. Вход логической схемы чувствителен к положительному импульсу, когда он находится в состоянии "0", и к отрицательному импульсу - в состоянии "1". Тогда в зависимости от последовательности числовых операций, выполняемых цифровым устройством, происходящих точно в момент разряда, схема становится уязвимой для той, или иной полярности наведенных помех.

Наведенные помехи могут распространяться внутри аппаратуры сквозь неоднородности в металлических стенках. Можно предположить, что при высокой частоте (300 МГц и более), на которую распространяется спектр ЭСР, поверхностный эффект должен вытеснять ток на наружные стенки. Это было бы правильно, если бы корпус имел идеальное экранирование, что достигается в редких случаях. Щели, разрывы и кабельные вводы создают значительные утечки электромагнитного поля из экранированной области для высоких частот. Можно восстановить целостность экрана обычными методами, которые рассмотрены ниже, но тогда остается другое серьезное проявление электростатической связи: помехи во внешних цепях. На рис. 1.19 схематично изображено это явление.

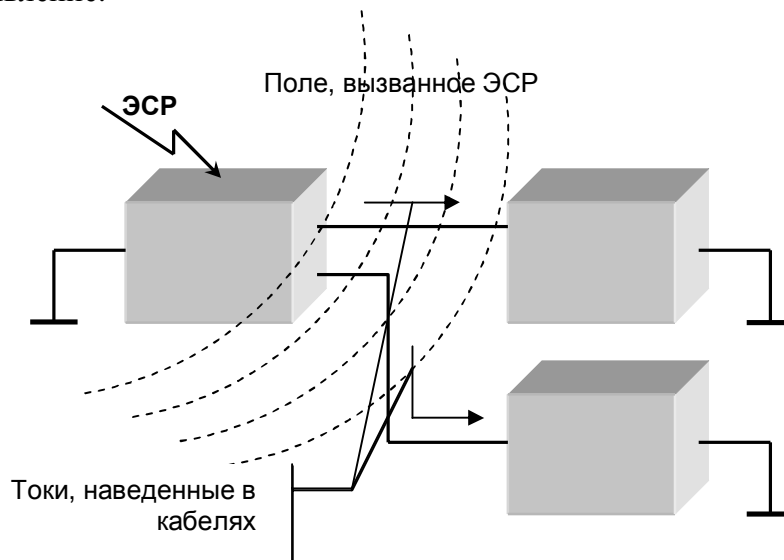


Рис. 1.19. Роль внешних цепей в распространении ЭСР.

В этом случае поле, излучаемое вблизи разряда, охватывает кабели и наводит в них токи, часть из которых замыкается на землю через заземление экранов кабелей. Протекая по экрану, наведенные токи в свою очередь вызывают индуцированные токи в сигнальных проводниках и других узлах аппаратуры, особенно, если заземление выполнено не качественно. При использовании неэкранированных кабелей возможно непосредственное проникновение наведенных помех в них.

При рассмотрении этого явления необходимо учитывать следующее. Электромагнитное поле, существующее вне прибора, наводит в кабелях токи тем более опасные, чем выше его частота, причем подавление этих возмущений во входных устройствах (приемниках, трансформаторах, дифференциальных усилителях и др.) практически равно нулю, если заранее не предприняты соответствующие защитные меры. Основные из них рассмотрены далее.

При экранированных кабелях все будет зависеть от передаточного сопротивления экрана и качества его присоединения к корпусу. Например, при рассматриваемых частотах коаксиальный кабель имеет переходное сопротивление не менее 1 Ом. При этом на центральной жиле будут наведены напряжения в несколько Вольт. В случае экранированных линий, которые в ряде случаев соединяют с корпусом только на одном конце экрана, все успешно решается при низких частотах и становится катастрофическим на высоких частотах и при электростатических разрядах, причем плавающий конец может приобрести потенциал в десятки и даже сотни вольт. В данном случае следует учитывать не только параметры электромагнитной совместимости, но и вопросы электробезопасности персонала, поскольку не исключена возможность прикосновения к незаземленному концу экрана кабеля.

1.6 Действие статического электричества на проводники и изоляторы

Рассмотрим некоторые эффекты, связанные с наличием в диэлектрике статических электрических зарядов. Проявления этих эффектов чрезвычайно важны, так как результат их действия на электронное оборудование и отдельные компоненты могут вызвать повреждение последних.

1.6.1 Действие электростатического поля на проводник

Результат воздействия статического электрического поля на проводник описывается электростатической индукцией. Рассмотрим систему, состоящую из заряженного диэлектрика A и проводника B (рис. 1.20). Проводник B расположен вблизи заземлённого экрана (рис. 1.20,а). Если диэлектрик заряжен положительно, то в проводнике происходит перераспределение зарядов: на ближней к изолятору стороне сосредотачиваются отрицательные *связанные* заряды, а на другой стороне – *свободные наведённые* заряды. При этом общий заряд проводника $Q_B = 0$. Наведённые заряды создают электростатическое поле между проводником и экраном, которое определяет напряжение U_B проводника относительно "земли". Таким образом, *незаряженный проводник в присутствии заряженного диэлектрика обладает некоторым потенциалом относительно земли*.

Если проводник в рассматриваемой системе заземлить (рис. 1.20,б), то его потенциал станет нулевым $U_B = 0$, а индуцированные связанные заряды создают некоторую разность потенциалов между проводником и диэлектриком. В этом случае отрицательно заряженный проводник имеет нулевой потенциал.

Для практики особый интерес представляет первый рассмотренный выше случай. На теле человека, находящегося вблизи заряженного предмета, за счёт электростатической индукции наводится сосредоточенный заряд, и *тело приобретает некоторый потенциал относительно заземлённых элементов*. Касаясь этих элементов, человек может вызвать разряд статического электричества. Если речь идёт о монтажнике электронных компонентов или наладчике, то возможны повреждения микросхем. При работе с электронным оборудованием может происходить его повреждение, вызванное тем, что индуцированные заряды внутри компонента могут создавать поля, превышающие некоторый уровень порогового напряжения. Происходит пробой внутри компонента, что приводит к выходу его из строя.

1.6.2 Действие электростатического поля на изолятор

В случае если материал, помещенный в электрическое поле, является диэлектриком, описанные выше процессы происходить не могут, так как в *диэлектрике отсутствуют мобильные носители заряда*.

Электрическое поле может только возмущать сложившееся распределение положительных и отрицательных зарядов в молекулярном строении диэлектрика. Под воздействием этого поля происходит достаточно тонкий, относительный сдвиг электронов и ядер, называемый *поляризацией* молекул (атомов) диэлектрика.

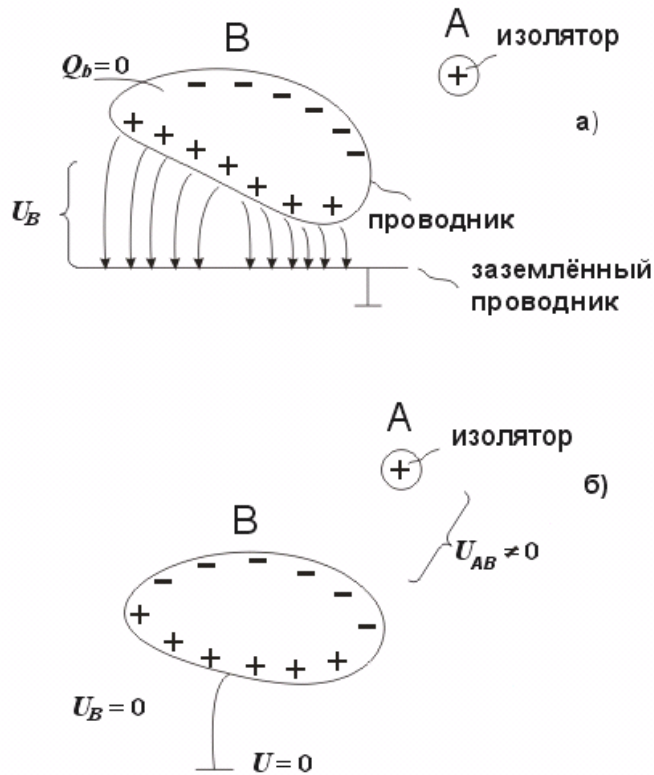


Рис. 1.20. Изолированный проводник рядом с заряженным изолятором: А – изолятор, В – проводник, а – проводник не заземлён; б - проводник заземлён.

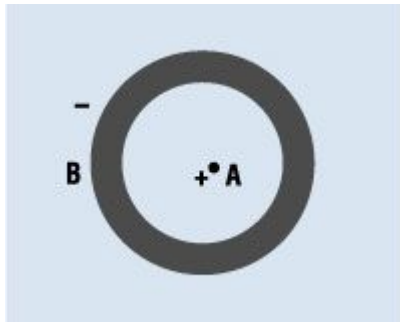


Рис. 1.21. Симметричное положение электронного облака (В) относительно ядра (А) в атоме в нейтральной ситуации (нет электрического поля).

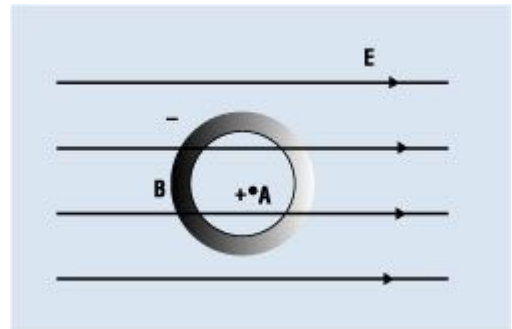


Рис. 1.22. Атом в электрическом поле (E) с ядром (А) и асимметричным электронным облаком (В).

На рис. 1.21 показан атом в отсутствии электрического поля. Атом нейтрален и электроны распределены симметрично. При воздействии поля электростатического заряда эта симметрия нарушается: электронное облако будет смещено во встречном направлении относительно поля, а ядро смещается по направлению поля (рис. 1.22).

Таким образом, при действии электростатического поля на диэлектрик этот диэлектрик поляризуется, а наблюдаемое явление называется **поляризацией**.

Расстояние между положительным зарядом и усреднённым отрицательным зарядом зависит от напряжённости поля и может быть смоделировано электрическим вибратором (рис. 1.23). В теле изолятора в результате поляризации формируется множество элементарных вибраторов (рис. 1.24), суммарное действие которых может быть представлено в виде некоторой нити вибраторов (рис. 1.25).

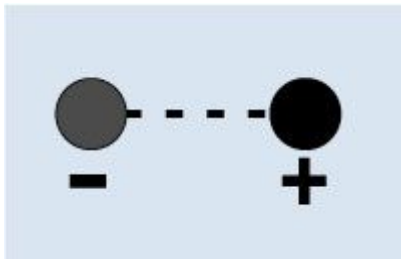


Рис. 1.23. Электрический вибратор.

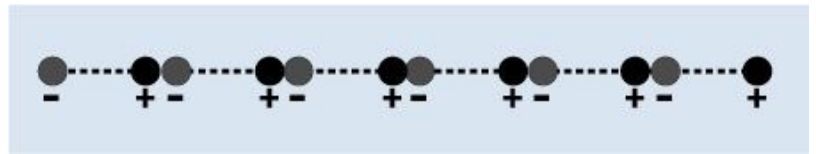


Рис. 1.24. Нить элементарных вибраторов.



Рис. 1.25. Нить эквивалентного вибратора.

Поляризация, с одной стороны, может быть использована для увеличения ёмкости конденсаторов. С другой стороны, она изменяет свойства диэлектрических поверхностей (подложек микросхем, слоистых пластиков) и с этим следует считаться при создании технологии прецизионных изделий.

Проводник "А", помещенный в электрическое поле с напряженностью E_0 , показан на рис. 1.26. В результате действия поля образует на левой стороне проводника связанный наведенный заряд отрицательной полярности и освобождает на правой стороне равный по величине положительный свободный наведенный заряд. Суммарное поле внутри проводника равно нулю. *Если проводник заземлен, свободный заряд может быть удален.*

Рассмотрим эффект **поляризации диэлектрика**. Если для проводника в электрическом поле заряды разделяются на границы на связанные и свободные, то диэлектрик в электрическом поле подвергается поляризации (рис. 1.26). Внутреннее поле E_p , сформированное нитями элементарных вибраторов, имеет противоположное внешнему полю направление и частично компенсирует его.

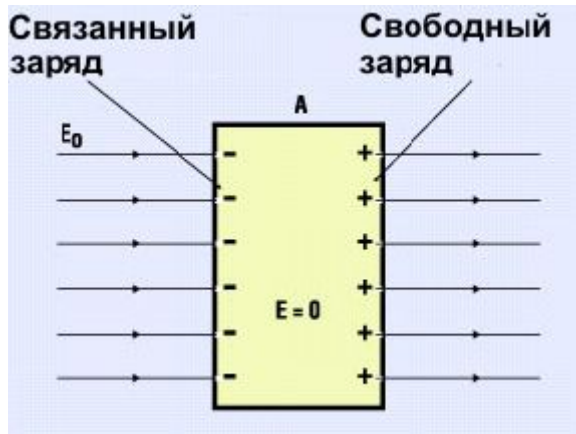


Рис. 1.26. Проводник в электрическом поле.

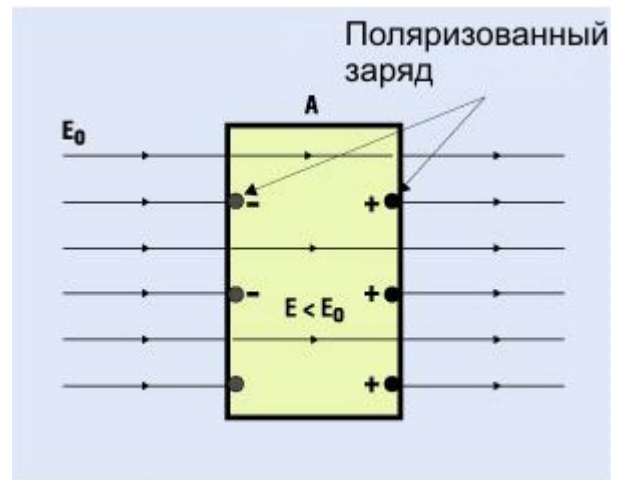


Рис. 1.27. Диэлектрик в электрическом поле.

Результирующее электрическое поле внутри диэлектрика равно:

$$E = E_0 - E_p \quad (1.41)$$

При этом отношении

$$\frac{E_0}{E} = \epsilon_r \quad (1.42)$$

представляет собой относительную диэлектрическую проницаемость и характеризует диэлектрические свойства материала. Значение ϵ_r для воздуха равно 1, а для наиболее широко распространенных материалов, которые используются в конструкциях электронных средств и при их изготовлении, значение относительной диэлектрической проницаемости лежит в диапазоне от 2 до 7 (ориентировочные значения: изоляция кабелей и проводов – 3...4, влагозащитные лаки – 4, основания печатных плат – 5,6...6).

Мы видим, что в отличие от наведённых зарядов в проводнике **поляризационные заряды не могут быть удалены из диэлектрика**.

Поляризация влияет на ёмкостные параметры системы. На рис. 1.27 показан плоскопараллельный конденсатор с электрометром. При воздушном диэлектрике (рис. 1.27,а).

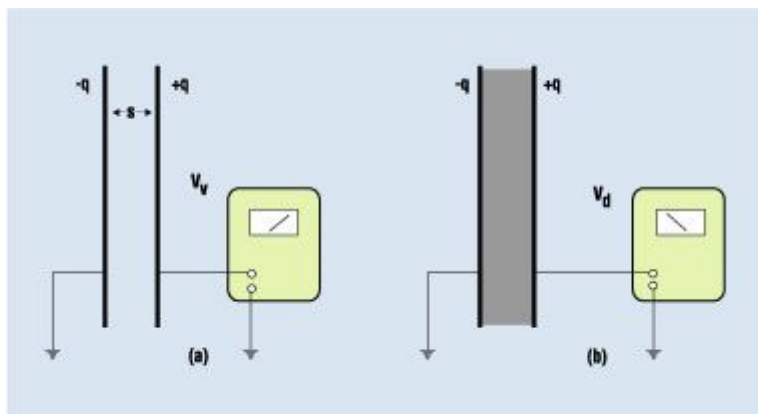


Рис. 1.28. Плоскопараллельный конденсатор, соединенный с электрометром:
а – с воздушным диэлектриком; б – с изолятором.

Система имеет заряд q и напряжение V_v . Когда пространство между обкладками заполнено некоторым диэлектриком с ϵ_r , напряжение становится равным V_d . Согласно (1.42) напряжённость поля внутри диэлектрика будет в ϵ_r меньше, чем было в воздухе. Поэтому

$$\epsilon_r = \frac{E_v}{E_d} = \frac{E_v \cdot S}{E_d \cdot S} = \frac{V_v}{V_d}. \quad (1.43)$$

Поскольку заряд конденсатора не изменен, то

$$C_d = \epsilon_r C_v \quad (1.44)$$

Таким образом, **включения диэлектрика приводит к увеличению ёмкости конденсатора**. Кроме этого, **увеличивается напряжение пробоя**, что является положительным фактором.

Поляризация проявляется в частицах диэлектрических материалов, переносимых по воздуху. Поле поляризует частицу (рис. 1.29). Положительные и отрицательные заряды имеют одинаковое значение, но поскольку напряжённость поля на границе с положительным зарядом выше, чем на границе с отрицательным зарядом, то и сила F_+ , действующая на положительный заряд, больше силы F_- , действующей на отрицательный заряд. Равнодействующая сила равна:

$$F = F_+ - F_- \quad (1.45)$$

заставляет частицу двигаться в сторону увеличивающейся напряжённости поля до первого препятствия, пересекающего силовые линии поля, на котором они осаждаются.

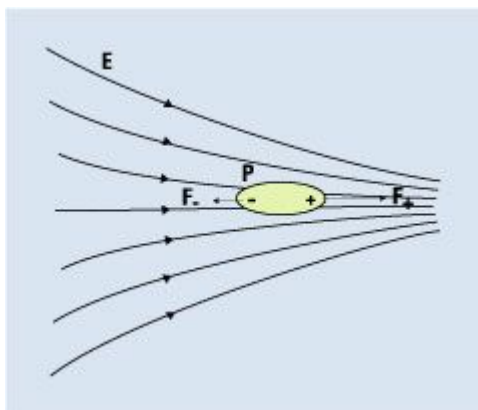


Рис. 1.29. Поляризация частиц диэлектрика.

Предположим, что мы имеем положительно заряженную поверхность, например, поверхность пластмассы. Поверхность, очевидно, привлечет отрицательные заряженные частицы аэрозоля. Важный пример этого явления заключается в использовании статических зарядов в чистых помещениях. Хотя воздух в них достаточно чист, всегда имеются некоторые частицы аэрозоля. Например, если кассета для полупроводниковых пластин имеет заряд, это может заставлять некоторые из частиц осаждаются на поверхность подложки с нежелательными последствиям, вплоть до разрушения подложки.

Другой распространенный случай – поле перед монитором или телевизионным экраном с электронными лучевыми трубками. Поле, созданное электродами в трубке, наиболее сильное у поверхности экрана, что способствует осаждению частиц пыли на экран.