МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC TR 61340-1— 2023

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатические явления

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

(IEC TR 61340-1:2012+AMD1:2020 CSV, Electrostatics — Part 1: Electrostatic phenomena — Principles and measurements, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и общие правила проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Акционерным обществом «Научно-производственная фирма «Диполь» (АО «НПФ «Диполь») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии документа, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 31 марта 2023 г. № 160-П)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	ЗАО «Национальный орган по стандартизации и метрологии» Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Россия	RU	Росстандарт
Узбекистан	UZ	Узстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 мая 2023 г. № 296-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC TR 61340-1—2023 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2023 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC TR 61340-1:2012 «Электростатика. Часть 1. Электростатические явления. Принципы и измерения» («Electrostatics — Part 1: Electrostatic phenomena — Principles and measurements», IDT), включая изменение AMD1:2020.

Международный документ разработан Техническим комитетом по стандартизации IEC/TC 101 «Электростатика» Международной электротехнической комиссии (IEC).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ 1.5 (подраздел 3.6).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА.

Дополнительные сноски в тексте стандарта, выделенные курсивом, приведены для пояснения текста оригинала

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация о введении в действие (прекращении действия) настоящего стандарта и изменений к нему на территории указанных выше государств публикуется в указателях национальных стандартов, издаваемых в этих государствах, а также в сети Интернет на сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации.

В случае пересмотра, изменения или отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации в каталоге «Межгосударственные стандарты»

© IEC, 2020
© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

В Российской Федерации настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Основы статического электричества 3
5 Проблемы и опасные проявления статического электричества 10
6 Основные решения проблем и защита от опасных явлений 17
7 Полезные применения электростатических явлений 18
8 Общие аспекты измерений 19
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам 29
Библиография 30

Введение

Статическое электричество известно уже около 2500 лет, но до недавнего времени его влияние на человеческую деятельность было незначительным. В прошлом столетии природа статического электричества стала более понятной и появилась возможность описать принципы разделения и накопления заряда. Несмотря на это, из-за множества взаимно влияющих факторов трудно в той или иной ситуации предвидеть полярность и величину возникающих зарядов. Во многом электростатика все еще остается «черной магией», а не наукой.

Развитие современных материалов, особенно полимеров, и их массовое применение для покрытий полов, отделки помещений, изготовления мебели, одежды и продукции технического применения сделали статическое электричество повсеместным явлением. В ряде отраслей промышленности, таких как производство электроники или реализация процессов с использованием легковоспламеняющихся материалов, непреднамеренные и невидимые разряды статического электричества приводят к появлению брака, утрате надежности производимой продукции, возникновению пожаров и взрывов. В повседневной жизни опыт удара электростатическим разрядом стал для людей обычным явлением. Это привело к возрастающей потребности понять такие явления и выявить материалы, оборудование и меры, предотвращающие или ограничивающие опасные и нежелательные проявления статического электричества в жизнедеятельности человека.

В стандарте представлен обзор вопросов, связанных с электростатикой, дающий пользователям представление об общих сведениях, принципах, методах измерений и практическом применении документов, разработанных Техническим комитетом IEC/TC 101.

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатические явления

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Electrostatics. Electrostatic phenomena. Principle physics and measurement methods

Дата введения — 2023—07—01

1 Область применения

В настоящем стандарте отражены принципиальные основы электростатических явлений, включая генерирование, накопление и стекание зарядов, а также описание электростатических разрядов.

В стандарте представлено обобщенное описание методов измерений физических величин, наблюдаемых при электростатических явлениях, и характеризующих их свойствах материалов, описаны опасные проявления и проблемы, связанные с электростатическими явлениями, принципы их предупреждения и защиты от них, а также приведен обобщенный обзор полезного применения электростатических эффектов.

Стандарт предназначен для использования при разработке стандартов, в которых учитываются электростатические явления, а также для применения в качестве рекомендации пользователям стандартов по обеспечению антистатической защиты.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения)]:

IEC 60079-10-1, Explosive atmospheres — Part 10-1: Classification of areas — Explosive gas atmospheres (Взрывоопасные среды. Часть 10-1. Классификация зон. Взрывоопасные газовые среды)

IEC 60079-10-2, Explosive atmospheres — Part 10-2: Classification of areas — Explosive dust atmospheres (Взрывоопасные среды. Часть 10-2. Классификация зон. Взрывоопасные пылевые среды)

IEC TS 60079-32-1:2013, Explosive atmospheres — Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance (Взрывоопасные среды. Часть 32-1. Электростатика. Опасные проявления. Руководство)

IEC 60079-32-2, Explosive atmospheres — Part 32-2: Electrostatics hazards — Tests (Взрывоопасные среды. Часть 32-2. Электростатика. Опасные проявления. Методы испытаний)

IEC 61000-4-2, Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test (Совместимость технических средств электромагнитная (ЭМС). Часть 4-2. Требования и методы испытаний. Устойчивость к электростатическим разрядам)

IEC 61340-5-1, Electrostatics — Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena — General requirements (Электростатика. Часть 5-1. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования)

IEC TR 61340-5-2, Electrostatics — Part 5-2: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena — User guide (Электростатика. Часть 5-2. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Руководство по применению)

Издание официальное

IEC 61340-6-1, Electrostatics — Part 6-1: Electrostatic control for healthcare — General requirements for facilities (Электростатика. Часть 6-1. Электростатический контроль при оказании медицинских услуг. Общие требования к лечебным учреждениям)

IEC 60243-1, Electric strength of insulating materials — Test methods — Part 1: Tests at power frequencies (Электрическая прочность изоляционных материалов. Методы испытаний. Часть 1. Испытания на промышленных частотах)

IEC 60243-2, Electric strength of insulating materials — Test methods — Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage (Электрическая прочность изоляционных материалов. Методы испытаний. Часть 2. Дополнительные требования к испытаниям при постоянном напряжении)

ISO/IEC 80079-20-2, Explosive atmospheres — Part 20-2: Material characteristics — Combustible dusts test methods (Взрывоопасные среды. Часть 20-2. Характеристики материалов. Методы испытаний горючей пыли)

ISO 80079-36:2016, Explosive atmospheres — Part 36: Non-electrical equipment for explosive atmospheres — Basic method and requirements (Взрывоопасные среды. Часть 36. Неэлектрическое оборудование для взрывоопасных сред. Общие требования и методы испытаний)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **антистатическая добавка** (antistatic additive): Вещество, добавляемое или вводимое в жидкие или твердые материалы в целях снижения способности материала приобретать заряд при контакте или при трении, повышения способности к перемещению заряда и снижения способности объекта удерживать заряд при контакте с землей.

3.2 **антистатик** (antistatic): Свойство материала, способного препятствовать или ограничивать трибоэлектрическое заряжение.

3.3 **соединение перемычками** (bonding): Электрическое соединение двух или более электропроводящих объектов, снижающее разность потенциалов между ними до незначительного уровня.

3.4 **пробой** (breakdown): Потеря изолирующей средой, возможно временно, изоляционных свойств под воздействием электрического напряжения.

3.5 **пробивное напряжение** (breakdown voltage): Напряжение, при котором происходит пробой в предусмотренных условиях испытаний или применения.

3.6 **стекание заряда** (charge decay): Нейтрализация или перемещение заряда в материале или через него, сопровождающиеся снижением плотности заряда или потенциала заряженной поверхности.

3.7 **время стекания [релаксации] заряда** (charge decay time): Время, требующееся для снижения заряда от верхнего установленного уровня до нижнего установленного уровня.

Примечание 1 — В качестве нижнего установленного уровня обычно принимается значение, составляющее одну десятую или 1/e от начального значения (e = 2,718).

3.8 **проводимость** (conductivity): Способность вещества проводить электрический ток, выраженная в См · $м^{-1}$.

3.9 **проводник;** *проводящий материал* (conductor or conductive material): Объект или материал, обеспечивающий достаточно высокую проводимость, при которой разность потенциалов между любыми его частями практически незначима.

Примечание 1 — В общем случае это материал, имеющий сопротивление ниже 10^5 Ом, при этом различными стандартами могут быть установлены свои диапазоны сопротивления для этого термина.

3.10 **рассеивающий материал** (dissipative material): Материал, который обеспечивает возможность перемещения заряда на поверхность и/или через его объем за время, которое существенно меньше времени его заряжения и времени, приводящего к проблемам, связанным с электростатикой.

Примечание 1 — Чаще всего рассеивающим считается материал, имеющий сопротивление в диапазоне от 10^5 до 10^{11} Ом. Различные стандарты могут устанавливать свои предельные значения сопротивлений.

3.11 **земля;** *заземление* (earth, earthing, grounding): Электрическое соединение (перемычкой) проводника с общей шиной заземления, гарантирующее, что потенциал проводника и потенциал земли одинаковы.

3.12 **электростатический разряд;** ЭСР (electrostatic discharge, ESD): Перенос заряда непосредственным соприкосновением или пробоем при разности потенциалов между объектом и окружающей его средой.

3.13 **группы взрывоопасных смесей** (explosion groups): Смеси горючих газов с воздухом, подразделенные на группы взрывоопасности I, IIA, IIB и IIC, характеризующие их воспламеняемость[1)].

Примечание 1 — Наиболее чувствительна к взрыву группа IIC.

Примечание 2 — Метод классификации приведен в [10][2)].

3.14 **огнеопасное вещество** (flammable substance): Газ, жидкость, твердое вещество или их смеси, способные к распространению горения при достаточном для зажигания воздействии источника зажигания.

3.15 **пороговое напряжение электростатической опасности** (hazard threshold voltage): Минимальное значение напряжения заряженной емкости, при котором может наступить опасность проявления статического электричества.

3.16 **взрывоопасные зоны** (hazardous area): Зона, в которой присутствует или существует вероятность присутствия огнеопасного вещества в таких количествах, при которых требуются меры предупреждения зажигания.

Примечание 1 — Определения взрывоопасных зон приведены в IEC 60079-10-1 и в IEC 60079-10-2.

3.17 **диэлектрик;** *изоляционный материал* (insulator): Материал с очень низкой скоростью диссипации заряда, при которой заряд на поверхности сохраняется длительное время.

Примечание 1 — Присоединение диэлектрика к линии заземления не обеспечивает стекание заряда.

3.18 **минимальная энергия зажигания;** МЭЗ (minimum ignition energy): Наименьшее, в соответствии с установленной методикой, количество энергии при искровом разряде емкости, способном зажечь смесь определенного огнеопасного материала с воздухом или кислородом.

3.19 **релаксация заряда** (relaxation of charge): Утечка, или нейтрализация заряда через твердый, жидкий или газообразный материал, приводящая к снижению энергии и поверхностной плотности заряда.

Примечание 1 — Потенциал поверхности также снижается.

3.20 **поверхностная плотность заряда σ_s** (surface charge density): Величина заряда, приведенная к единице площади твердой поверхности или поверхности жидкости.

3.21 **удельное поверхностное сопротивление, Ом** (surface resistivity): Сопротивление между противоположными сторонами квадрата на поверхности материала.

3.22 **трибоэлектрическое заряжение** (triboelectric charging): Процесс электрического заряжения, при котором заряд генерируется при контакте и последующем разделении двух поверхностей, которые могут быть твердыми, жидкими или поверхностями частиц, переносимых потоком газа.

3.23 **объемная плотность заряда σ_v** (volume charge density): Величина заряда, приведенная к единице объема твердой, жидкой или газообразной фазы.

3.24 **удельное объемное сопротивление, Ом · м** (volume resistivity): Сопротивление между противоположными квадратными сторонами материала в форме куба с объемом 1 м^3.

4 Основы статического электричества

4.1 Общие положения

В основном электростатические заряды на материале, изделии или объекте — это результат:
- прикосновения и трения;
- переноса заряда;
- электростатической индукции;
- поляризации;

[1)] *ГОСТ 31610.20-1—2020 предусматривает классификацию трех групп взрывоопасных смесей I, IIA, IIB, IIC, IIIA, IIIB, IIIC, выделенных в подгруппы согласно ГОСТ 31610.0.*

[2)] *Ссылки в квадратных скобках относятся к разделу «Биография».*

- проявления фотоэффекта;
- проявления пироэлектрического эффекта;
- проявления пьезоэлектрического эффекта;
- ионизации и адсорбции ионов;
- электрохимических процессов.

При этом первичным источником электростатического заряда является трибоэлектрическое заряжение. Если две первоначально не заряженные поверхности привести в соприкосновение, произойдет перенос заряда в основном на общей, разделяющей их границе. Если газ содержит взвешенные твердые или жидкие частицы, которые становятся заряженными при контакте и последующем разделении, то можно увидеть, что газ электростатически заряжен. При разделении каждая поверхность уносит заряды одинаковые по величине и противоположные по знаку. Проводящие или рассеивающие объекты могут приобрести заряд посредством индукции под воздействием электрического поля других заряженных объектов или проводников с высоким потенциалом. Любой объект может стать заряженным, если на нем аккумулируются заряженные частицы или ионы.

Очень важно иметь представление об этих явлениях, чтобы обеспечивать надлежащее выполнение процедур проверки и однозначную интерпретацию получаемых данных. Это также важно для выбора электродов, защиты приборов для измерения тока от начального емкостного скачка и влияния времени их инерционности на обработку результатов измерения. Инерционность измерений должна соответствовать требованиям к получаемым данным. Детальные комментарии включены в описания отдельных методов испытаний.

4.2 Контактная электризация

Контактная электризация может происходить при взаимодействии двух твердых материалов, двух жидкостей или твердого материала и жидкости. Чистые газы не могут заряжать материалы таким путем. Если газ содержит твердые частицы или капли жидкости во взвешенном состоянии, то они могут заряжаться, и такой газ может нести эти заряженные частицы.

В случае различных твердых материалов, первоначально не заряженных и находящихся под потенциалом земли, при соприкосновении между ними происходит передача заряда от одного материала к другому. Когда они разделяются, свободный положительный заряд остается на одной поверхности, а свободный отрицательный заряд — на другой поверхности. Количество заряда возрастает с размером площади контакта и воздействующего давления. Дополнительное трение также увеличивает эффективную контактную площадь.

Связь между величиной и полярностью зарядов, получаемых материалами, можно представить в виде списков, так называемых трибоэлектрических рядов. Ожидается, что материал зарядится положительно при взаимодействии с материалом, расположенным в таком ряду ниже его, и отрицательно — при взаимодействии с материалом, расположенным выше его. Нужно отметить, что положение материала в трибоэлектрическом ряду недостаточно определенное, зависящее от условий испытания. К тому же два образца из одного и того же материала при трении друг с другом могут довольно сильно заряжаться.

Примеры трибоэлектрических рядов представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Примеры трибоэлектрических рядов

Предмет	Заряд
Мех кролика Стекло Человеческие волосы Полиамид (нейлон) Шерсть Мех Шелк Алюминий Бумага Хлопок Сталь Дерево	Положительный

Окончание таблицы 1

Предмет	Заряд
Резина Ацетатный искусственный шелк Полиэтилен (ПЭ) и полипропилен (ПП) Политетраэтилен (ПТЭ) Винипласт (НПВХ) Полиуретан Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	Отрицательный

Два соприкасающихся предмета взаимно заряжаются зарядами противоположных знаков, и между ними образуется электрическое поле. При последующем их разделении преодолевается сила их взаимного притяжения и линейно с увеличением расстояния между ними возрастает разность потенциалов. При этом происходит утечка зарядов через любые остающиеся участки соприкосновения разделяемых материалов. В случае двух проводников рекомбинация зарядов практически полная и ни на одном материале зарядов после разделения не остается. Если один или оба материала являются непроводящими, может не быть полной рекомбинации зарядов, и разделяющиеся материалы сохранят часть своего заряда. При этом, несмотря на то что сохраняется только небольшая часть первоначального количества разделяемых зарядов, т. к. расстояние между ними при соприкосновении поверхностей было чрезвычайно мало, потенциал после их разделения может достичь многих киловольт. Реальные поверхности обычно имеют некоторую шероховатость, и их заряжение возрастает, если под воздействием давления или трения увеличивается площадь контакта. Следует заметить, что реальная площадь соприкосновения материалов существенно отличается от площади их номинального контакта. Они могут отличаться на порядок или более.

Контактная электризация жидкостей — такой же сложный процесс, но зависящий еще и от присутствия ионов и заряженных микроскопических частиц (в меньшей степени). Если ионы (или частицы) одной полярности абсорбированы поверхностью, то к ним притянутся ионы противоположной полярности, которые образуют диффузионный заряженный слой в жидкости, примыкающий к поверхности. Если жидкость затем переместится относительно поверхности, то она унесет часть этого диффузионного слоя, тем самым обеспечив разделение положительных и отрицательных зарядов. Как и в случае твердых частиц, высокое напряжение образуется в результате работы, затраченной на разделение зарядов, если жидкость недостаточно электропроводна, чтобы предотвратить их взаимную нейтрализацию. Такие процессы могут протекать на границах твердого материала/жидкости и жидкости/жидкости.

4.3 Заряжение индукцией

Электрическое поле существует вокруг любого заряженного объекта. Проводник или рассеивающий материал, введенный в поле заряженного объекта, изменяет начальную конфигурацию его электростатического поля, и в то же самое время под влиянием его воздействия в нем происходит перераспределение зарядов (рисунок 1a). Если незаряженный объект изолирован от земли, то он приобретет электростатический потенциал, зависящий от его положения в поле заряженного тела. Такой объект способен вызывать электростатические разряды из-за энергии приобретенного потенциала.

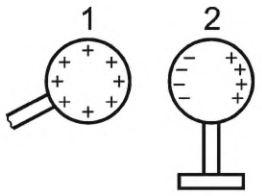


Рисунок 1a) – Сближение заряженного объекта (1) с незаряженным объектом (2)

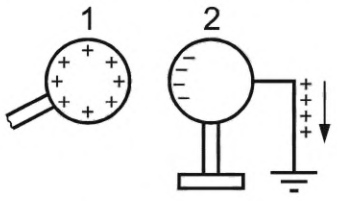


Рисунок 1b) – Кратковременное соединение незаряженного объекта (2) с заземлением. Незаряженный объект заряжается, но приобретает потенциал земли



Рисунок 1c) – Удаление соединения с землей и затем первого объекта; проводник остается заряженным (в данном примере – отрицательно)

Рисунок 1 — Заряжение индукцией

Если, пока действует электростатическое поле, объект кратковременно соединить с землей, потенциал объекта снижается до нуля и на нем остается неуравновешенный заряд (рисунок 1b). Когда воздействующее электростатическое поле устраняется, свободный заряд остается (рисунок 1c). Если объект 2 отключен от земли, а воздействующее поле устранено, то с него может произойти разряд. Считают, что таким образом проводящий объект зарядился посредством индукции. Разряд с такого объекта может представлять опасность, например, при перемещении изолированного человека вблизи заряженных материалов.

4.4 Передача заряда проводимостью

Всякий раз, когда заряженный объект контактирует с другим объектом (рисунок 2), их заряды перераспределяются в такой степени, в которой позволят их проводимость и емкость. Это потенциальный источник электростатического заряжения. Так, например, заряжаются твердые объекты, на которых осаждаются заряженные брызги, туман или пыль. Подобная передача зарядов может также происходить, когда объект находится в ионизированном потоке газа.

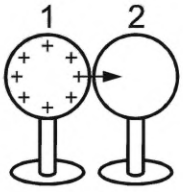


Рисунок 2a) – Заряженный объект соприкасается с незаряженным объектом. Положительный заряд передается на незаряженный объект

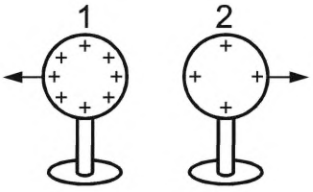


Рисунок 2b) – Разделение заряженных объектов

Рисунок 2 — Передача заряда проводимостью, когда объекты 1 и 2 являются проводниками

4.5 Сохранение заряда

Даже после разделения в процессе заряжения электростатические заряды быстро взаимно нейтрализуются непосредственно или через землю, если для этого не возникнет препятствий. Если заряд находится на непроводящем объекте, то он сохраняется из-за электрического сопротивления материала. Чтобы заряд сохранялся на проводнике, проводник должен быть изолирован от других проводников и земли.

Чистые газы, как и воздух, в обычных условиях являются непроводящими, и взвешенные частицы или капли в облаках пыли, в тумане или в распыленных системах могут сохранять свои заряды очень долго независимо от электропроводности самих частиц.

Скорость утечек заряда зависит от электрического сопротивления непроводящих объектов в системе и емкостей проводников. Этот процесс известен как релаксация. Значения электрического сопротивления, удельного сопротивления, электропроводности или скорости стекания заряда, которые требуются для решения электростатической проблемы, зависят в основном от рассматриваемой системы.

Во многих производственных процессах часто происходит непрерывная генерация электростатических зарядов, которые накапливаются на диэлектрике или обособленном проводнике, например когда поток заряженной жидкости или порошка поступает в изолированный металлический контейнер, или когда человек идет по изолированному напольному покрытию. В этом случае потенциал на изолированном проводнике — результат баланса между поступающим зарядом и скоростью его стекания. Эквивалентная электрическая схема показана на рисунке 3, а потенциал проводника вычисляют по формуле

$$V = V_0 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} + I \cdot R \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}\right), \quad (1)$$

где V — потенциал проводника В;

V_0 — начальный потенциал;

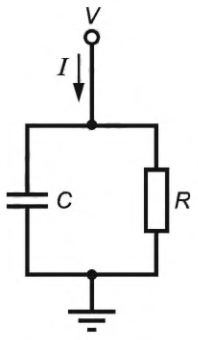
R — сопротивление заземления, Ом;

t — время от начала заряжения, с;

C — емкость проводника, Ф.

Максимальный потенциал достигается, когда t >> RC, и выражается как

$$V_{max} = I \cdot R. \quad (2)$$



IEC 1195/12

Рисунок 3 — Эквивалентная электрическая схема для заряженного проводника

Чтобы установить значение заряда, который может накопиться, можно измерить емкость изолированного объекта и его сопротивление относительно заземления или скорость стекания заряда. Это невозможно сделать для взвешенной в воздухе пыли или тумана.

Здесь принято допущение, что сопротивление или скорость релаксации заряда изоляционного материала — величина постоянная. Это не всегда так. Значение сопротивления для определенной разности потенциалов может меняться в зависимости от времени, и точно так же скорость стекания зарядов может быть функцией электрического напряжения (или количества заряда). Эти эффекты могут также зависеть от температуры и окружающей влажности.

4.6 Влияние влажности воздуха

4.6.1 Общие положения

Материалы в той или иной степени абсорбируют из воздуха воду, и в случае диэлектриков это может значительно увеличивать скорость стекания зарядов. Вода, абсорбированная поверхностью материалов, является основной составляющей поверхностной проводимости, которая отличается от их объемной проводимости. Данный эффект, хорошо наблюдаемый, но все еще плохо понятый, состоит в том, что проводимость увеличивается с количеством абсорбированной воды, то есть практически проводимость возрастает с увеличением относительной влажности. Эффект наблюдается даже при относительно низкой влажности (RH < 20 %), когда вода может присутствовать только в молекулярной форме и никакой свободной воды в виде слоя жидкости не существует.

4.6.2 Измерения в реальных условиях

При проведении измерений в реальных условиях часто невозможно управлять влажностью воздуха. Поскольку результаты измерений зависят от влажности, то важно записать значения условий окружающей среды во время измерения.

4.7 Электростатические разряды

4.7.1 Общие положения

Разряды статического электричества возникают, когда в газовой среде, например в воздухе, образуются перенапряжения или когда напряженность поля превышает его электрическую прочность. При нормальных климатических условиях электрическая прочность для плоских электродов или электродов с радиусом более 10 мм составляет приблизительно 3 МВ/м (30 кВ/см).

Типов электростатических разрядов достаточно много, и они зависят от системы, в которой возникают. Некоторые типы разрядов могут быть классифицированы в соответствии с 4.7.2—4.7.6, хотя данные описания не являются исчерпывающими и абсолютно определенными.

4.7.2 Искровые разряды

Искровой разряд — это электрический разряд между двумя проводниками с определенной разностью потенциалов. Для него характерен четкий ярко светящийся канал с высокой плотностью тока. Газ полностью ионизирован по всей длине канала. Разряд резкий и может сопровождаться четко слышимым щелчком (одиночным резким звуковым импульсом). Типичный пример — разряд между пальцем человека и большим металлическим объектом.

Разность потенциалов между проводниками, необходимая для создания электростатического поля, при котором происходит разряд, зависит от их формы и расстояния между ними.

Ток, протекающий в искровом канале, ограничен только импедансом внешней цепи, и в разряде протекает почти весь заряд, имеющийся на электродах перед разрядом. Поэтому в большинстве случаев при искровом разряде расходуется практически вся энергия, имеющаяся перед разрядом. Затраченную энергию вычисляют по формуле

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}, \quad (3)$$

где W — затраченная энергия, Дж;

Q — заряд конденсатора, Кл;

V — разность потенциалов, В;

C — емкость относительно земли, Ф

Это максимальное значение затраченной энергии. Любое сопротивление в разрядной цепи снижает энергию искры и увеличивает ее продолжительность. Типичные значения электрической емкости ряда объектов представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Типичные значения электрической емкости

Предмет	Емкость × 10^{-12}, Ф
Очень малые металлические объекты (винт, гвоздь)	От 1 до 10
Малые металлические объекты (совок, наконечник шланга)	от 10 до 20
Малые емкости (ведро, 50-литровый бочонок)	от 10 до 100
Среднеразмерные емкости (от 250 до 500 л)	от 50 до 300
Тело человека	от 100 до 300
Основное производственное оборудование (резервуары), примыкающее к заземленным конструкциям	от 100 до 1000
Автомобили	от 800 до 1200

4.7.3 Коронные разряды

Этот тип разрядов связан с проводниками с остриями или острыми краями. Коронные разряды могут возникать, когда такой проводник заземлен и приближается к наэлектризованному объекту или, альтернативно, если проводник находится под высоким напряжением. Разряды возникают вследствие того, что локальное электрическое поле у острой поверхности очень велико и обеспечивает возникновение перенапряжения (превышает 3 МВ/м). Так как перенапряжение быстро уменьшается по мере удаления от поверхности проводника, область ионизации не распространяется дальше границы перенапряжения. Коронный разряд может быть направлен к заряженному объекту или, в случае высокого потенциала проводника, в окружающее пространство.

Коронные разряды трудно увидеть, но при приглушенном освещении свечение можно заметить с некоторого расстояния. Вне этой ионизированной области ионы могут перемещаться на большие расстояния, и их движение зависит от направления поля.

Поле заряженной поверхности, вызывающее коронные разряды на смежных заземленных остриях, притягивает ионы противоположной полярности по отношению к тем, которые участвуют в разряде и, следовательно, заряд поверхности может снижаться. Этот процесс будет продолжаться до тех пор,

пока напряженность поля у острия не снизится ниже порога коронирования. При этом полная нейтрализация не происходит.

При коронном разряде также могут заряжаться поверхность или объект. Этот эффект может использоваться преднамеренно или случайно стать причиной опасности, например, когда изолированная металлическая деталь зарядится до высокого потенциала.

4.7.4 Кистевые разряды

Эти разряды могут возникать, когда заземленные проводники приближаются к заряженному изоляционному материалу (например, между пальцем человека и пластмассовой поверхностью или между металлической загрузочной трубой и поверхностью жидкости в резервуаре).

Это быстро протекающие кратковременные разряды, которые при подходящих условиях можно увидеть и услышать. В отличие от искровых разрядов в них расходуется только незначительная часть заряда, связанного с системой, и разряд не приводит к выравниванию потенциалов двух объектов.

4.7.5 Поверхностные кистевые разряды

Различие между кистевым разрядом и поверхностным кистевым разрядом состоит в том, что первый происходит, главным образом, в воздушном разрядном промежутке, а второй — на границе раздела фаз, например на поверхности материала. Причина второго разряда, являющегося поверхностным, состоит в том, что энергетическим источником служит поле, заключенное, главным образом, в тонком слое диэлектрического материала, а не внешнее поле, как в первом случае. Для его возникновения требуется напряжение пробоя тонкого слоя, которое значительно превышает напряжение пробоя соответствующего воздушного промежутка. Возникновения поверхностных кистевых разрядов можно избежать, если гарантировать, что напряжение пробоя диэлектрического слоя меньше, чем 4 кВ. Максимальное допустимое значение напряжения пробоя увеличивается с увеличением толщины диэлектрика и в определенных практических случаях допустимое напряжение пробоя может быть больше чем 4 кВ. Разряд можно инициировать или проводящим объектом, приближающимся к поверхности, или пробоем диэлектрика. Если поле в диэлектрике, обусловленное зарядом на его поверхности, достигает пробивного значения для материала диэлектрика, возникают спонтанный разряд и сопутствующий пробой (прокол) листа/покрытия. Начиная с этого пробоя (или с разряда на приближающийся объект) высокая параллельная составляющая электрического поля на поверхности диэлектрика приводит к возникновению ряда сильных поверхностных разрядов, в которых стекает большая часть поверхностного заряда.

Диэлектрический лист, поверхности которого заряжены зарядами противоположных знаков, подобен конденсатору с плоскопараллельными пластинами и с диэлектрической прослойкой между ними. Следовательно, энергию, реализованную в поверхностных кистевых разрядах, можно легко оценить по запасенной энергии. Эквивалентная емкость диэлектрического листа C_e с площадью A, толщиной d, электрической постоянной $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ Ф · м$^{-1}$ и относительной диэлектрической проницаемостью ε_r, удерживающая поверхностную плотность заряда σ, составляет

$$C_e = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \tag{4}$$

для плотности заряда σ, полного заряда q.

Пример:

d = 75 мкм, A = 0,5 м^2, ε_r = 2 и плотность электрического заряда σ = 10^{-3} Кл/м^2, запасенная энергия:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_e \cdot V^2,$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{C_e},$$

$$W = \left[A \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0} \right] \cdot \sigma^2 = 1 \text{ Дж}.$$

4.7.6 Конические разряды

Этот тип разряда возможен, когда, например, гранулы с высоким удельным сопротивлением загружаются в цилиндрическую ячейку. Загружаемые заряженные частицы, такие как пластмассовые гранулы, накапливаются и заполняют объем ячейки. Поле этого заряд проявляет отталкивающие силы, действующие на одноименно заряженные частицы, которые падают в загружаемый объем. Пока гравитационные силы преобладают над силами отталкивания частиц, происходит увеличение плотности заряда в объеме. Если заряженные частицы продолжают осаждаться в образовавшийся объем материала, когда напряженность поля превысила значение пробивной напряженности воздуха, происходят разряды на проводящие стенки заземленной цилиндрической ячейки.

4.8 Механические силы в электростатическом поле

Электрическое поле электрического заряда может проявляться в механическом воздействии на смежные объекты. Пленки, заряженные до нескольких микрокулон на квадратный метр, могут прилипать к металлическим предметам, а частицы пыли могут притягиваться полями, обусловленными значительно меньшей плотностью зарядов.

Например, сила, действующая на заряженную частицу вблизи от плоской заземленной пластины, может быть вычислена на основании закона Кулона:

$$F = \frac{q^2}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot d^2}, \quad (5)$$

где q — заряд частицы;

d — расстояние до пластины.

5 Проблемы и опасные проявления статического электричества

5.1 Общие положения

Электростатический разряд различают по типу и по воздействию, поскольку причины электростатических проблем могут быть различными. Разряды между металлическими структурами, искровые и поверхностные кистевые разряды наиболее сильные и опасные. Разряды с наэлектризованных объектов из изолирующих материалов также могут представлять опасность и могут быть источником зажигания огнеопасных газовых смесей или стать причиной повреждения электронных компонентов. Пробой изолирующих слоев полупроводникового устройства может произойти при напряжении менее 50 В, а для других повреждений, таких как плавление материала полупроводника, требуется энергия всего в несколько микроджоулей. Заряд жидкости или твердого объекта создает проблему при разряде на другое тело или на землю.

В хирургических отделениях или при производстве фармацевтических препаратов важно соблюдать особые требования по соблюдению чистоты. При этом может возникнуть необходимость контроля электростатических явлений, чтобы избежать заряжения частиц.

5.2 Электронные компоненты и системы

5.2.1 Общие положения

Электростатический разряд (ЭСР) — серьезная угроза для электронных компонентов и систем. Диапазон чувствительности электронных компонентов к воздействию ЭСР широк. Наиболее чувствительными являются, например, полупроводники, считывающие магниторезистивные (МР) головки и тонкопленочные резисторы. Электростатический потенциал от 10 В может стать причиной отказа некоторых компонентов.

Из-за высокой чувствительности предполагают, что все типы электростатических разрядов могут повреждать чувствительные электронные компоненты.

5.2.2 Типы повреждений

Повреждение от ЭСР может привести к катастрофическому отказу и скрытым дефектам.

Катастрофическое повреждение может привести к отказу или дефекту компонента и вызывать прекращение функционирования компонента или системы или несоответствие предъявляемым к ним требованиям.

У компонента со скрытым дефектом могут возникнуть изменения характеристик, которые не обязательно выйдут за пределы нормативных допусков. При этом могут быть деградационные эффекты, связанные с воздействием ЭСР. Компонент со скрытым дефектом может быть более восприимчив к последующим разрядам или любому другому воздействию напряжения. И вследствие этого увеличится вероятность сокращения его срока службы.

Сбой программы в программируемом компоненте в момент воздействия ЭСР или от электрических помех, возникающих при разряде, может проявиться в форме искажения хранящихся данных. Ложный сигнал может появиться из-за наложения наводимых токов или электромагнитных излучений, источником которых служит электростатический разряд.

Уровень повреждения компонента, в зависимости от типа механизма повреждения, определяется или напряжением, или мощностью. Различные типы компонентов и полупроводниковых устройств восприимчивы к тем или иным видам механизмов повреждения.

Один из наиболее распространенных механизмов повреждения связан с пробоем или проколом оксидной изоляции, диэлектрика или полупроводникового перехода (обрыв вследствие выгорания или короткое замыкание). Другой распространенный механизм повреждения связан с плавлением или сублимацией металлизации из-за высоких токов, возникающих в результате ЭСР.

Примеры компонентов, особенно восприимчивых к диэлектрическому пробою, включают полевые транзисторы (дискретный пробой оксидного затвора), микросхемы МОП, микросхемы с переходами металлизации и конденсаторы (в частности, МОП). Типичными видами отказов являются короткие замыкания или возрастание тока утечки (ухудшение вольтамперной характеристики).

Примеры компонентов, особенно восприимчивых к повреждению металлизации, включают СВЧ-транзисторы и интегральные микросхемы. Типичный вид отказа — обрыв цепи.

Поскольку все эти механизмы повреждения зависят от геометрического размера диэлектрического слоя, другого слоя изоляции, ширины и толщины металлизации и т.д., предполагается, что со временем проявляется тенденция увеличения чувствительности полупроводников к воздействию ЭСР. Однако для некоторых типов компонентов на их выводах реализуются защитные схемы от ЭСР, что снижает их чувствительность к ЭСР.

5.2.3 Проблемы и угрозы на различных этапах жизненного цикла

Все электронные системы в процессе применения уязвимы для электростатического разряда. Прямое поражение сильным разрядом любой части системы может создать токи или энергии достаточно высокие для повреждения компонентов, если данный разряд не протекает непосредственно в землю.

Даже разряд вблизи системы может повредить ее. Разряд излучает электромагнитное поле, способное инициировать токи в системе. Эти токи могут быть разрушительными или приводить к «программным дефектам», например к искажению информации наведенными импульсами. Микропрограммы некоторых компонентов могут быть также безвозвратно повреждены.

Электростатический разряд может произойти на кабель, расположенный далеко от системы, и волна перенапряжения (импульс высокого напряжения) может проникнуть в систему.

Во время изготовления электронных устройств обработка чувствительных электронных компонентов и сборка должны проводиться очень осторожно. Вокруг рабочего места есть много угроз электронике: заряженные операторы, одежда, незаземленные узлы механизмов, пластиковая упаковка и мусорные ведра, пластмассовые компоненты и т. д. Наиболее разрушителен искровой разряд. Такой разряд может произойти при соприкосновении с печатной платой наэлектризовавшегося оператора.

Заряд самого компонента также может вызвать повреждения. Заключенный в пластмассовый корпус полупроводник легко заряжается при трении о его поверхность, например об уплотнитель или пластиковый пакет. Этот заряд на пластмассовой поверхности капсулы индуцирует напряжение на проводниках полупроводника и на его вводах и выводах. При соприкосновении выводов компонента с металлическим инструментом или пальцем происходит разряд. Поскольку емкость этих объектов мала, а емкость инструмента или пальца (оператора) намного больше, разряд происходит очень быстро и вызывает протекание сильного тока. Даже если разряжается заряд с очень низкой энергией, для очень мелких элементов цепи ток может быть разрушительным.

В процессе производства компонентов возникают и другие проблемы, связанные с электростатическим заряжением. Полупроводники в процессе производства должны быть чрезвычайно чистыми, и их поверхность должна быть защищена. Если полупроводник заряжен, он притягивает пыль из воздуха. Та же самая проблема существует и в отношении других деталей электроники, например, в связи с загрязнением дисков, дисководов и электронно-оптических устройств.

Уровень, при котором компонент повреждается от электростатического разряда, зависит от структуры компонента и характеристик разряда. Могут возникать различные условия возникновения разрядов, но три типа из них — модель человеческого тела (МЧТ), механическая модель (ММ) и модель заряженного устройства (МЗУ) — выделены как применимые для большинства типов, даже если они не перекрывают все возможные влияющие на разряд условия. Модели используют, чтобы определить максимальное значение напряжения, которое компонент сможет выдержать без повреждений. Модель механического устройства больше не используется для классификации чувствительных к ЭСР устройств. В целях установления пределов для программ ЭСР-управления разряды ММ теперь рассматриваются в более широкой категории разрядов от обособленных проводников.

5.3 Опасность зажигания от статического электричества

5.3.1 Общие положения

Разряды статического электричества могут зажигать горючие газы, пыль, пары или аэрозоли. Зажигание вызывает сильно нагревающийся канал разряда.

5.3.2 Искровые разряды с электропроводящих объектов

Приблизительный расчет энергии искрового разряда может быть сделан, например, для незаземленного металлического барабана, заполненного продуктом размола. В этом случае зарядный ток примем равным 10^{-7} А. Сопротивление барабана относительно земли R примем 10^{11} Ом, а емкость около 50 пФ. Тогда возможное максимальное напряжение на барабане приблизительно через 15 с загрузки равно

$$V_{max} = I \cdot R = 10 \text{ кВ}.$$

Максимальная энергия W, реализованная при искровом разряде, равна:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{max}^2 = 2{,}5 \text{ мДж}.$$

Крутизна переднего фронта, амплитуда и продолжительность импульса разрядного тока при разряде — важные факторы, влияющие на уровень опасности. Скорость нарастания переднего фронта и амплитуда импульса тока определяет адиабатичность теплопередачи, наиболее способствующей зажиганию газовоздушной смеси. Наоборот, более длительная продолжительность разряда иногда приводит к увеличению вероятности зажигания пылевоздушной смеси. Включения высокого импеданса в цепь разрядного тока достаточно, чтобы уменьшить ток разряда и увеличить его продолжительность, что может снизить потенциальную опасность зажигания большинства огнеопасных смесей.

5.3.3 Коронные разряды с электропроводящих объектов

Плотность энергии в таком разряде намного меньше, чем в искре, и по этой причине коронные разряды обычно не способны стать источником зажигания. Однако при определенных обстоятельствах, например, если происходит увеличение потенциала заостренного проводника, корона может перейти в искру между этим проводником и другим, способствующим образованию искрового разрядного промежутка.

5.3.4 Кистевые разряды с изолирующих поверхностей

Если энергии вполне достаточно, кистевые разряды могут зажигать большинство взрывоопасных газов и паров. Зажигающая способность зависит от полярности разрядов и конфигурации электродов.

Пока еще нет уверенности в том, что кистевые разряды способны зажигать пылевоздушные смеси.

5.3.5 Скользящие кистевые разряды с изолирующих поверхностей

Для возникновения скользящих кистевых разрядов требуется высокая поверхностная плотность зарядов, которая обычно формируется там, где частицы сыпучих материалов взаимодействуют со стенками или покрытиями с высоким удельным сопротивлением, например, при пневмотранспорте сыпучих материалов по трубам из материалов с низким рассеиванием зарядов (высоким удельным сопротивлением) или по металлическим трубам с покрытиями из таких материалов. Скользящие кистевые разряды наблюдались, когда проводящие жидкости пульсировали (импульсно прокачивались) по шлангам из изолирующих материалов с сухой поверхностью. В других случаях при определенных обстоятельствах значительное трение может происходить между упакованным продуктом и упаковкой. Высокая поверхностная плотность зарядов может также стать результатом осаждения ионов на стенках или покрытиях с высоким удельным сопротивлением (низким рассеиванием). Большое количество ионов может проявляться в производственных условиях, например, во время увеличения объемной плотности зарядов

(при уплотнении в процессе осаждения) сыпучих материалов с высоким удельным сопротивлением. Такие разряды не возникают в слоях сыпучих материалов.

Судить о зажигающей способности скользящих кистевых разрядов можно, поскольку в каждом отдельном разряде реализуется большая часть заряда и запасенную энергию можно сравнить с минимальной энергией зажигания данного порошкообразного продукта. Разряды с такой энергией при непосредственном воздействии на электронные системы или устройства могут приводить к катастрофическим последствиям. Следует отметить, что разряд на землю через человека при такой энергии оказывает на него значительное физиологическое воздействие и представляет опасность.

5.3.6 Разряды с тела человека

Заряды на теле человека обычно вызывают опасность. Человек, изолированный от земли, может легко наэлектризоваться и оставаться в заряженном состоянии. Изоляция от земли может обеспечиваться напольным покрытием или подошвами обуви, выполненными из изоляционного материала. Существует много механизмов, обеспечивающих электризацию человека: для этого достаточно походить по полу, подняться с сиденья, снять одежду, воспользоваться пластмассовыми изделиями, слить жидкость или собрать заряженный материал в емкость, или постоять в поле заряженного объекта, например приводного ремня или изолирующей упаковки.

Если электростатически заряженный человек коснется электропроводящего объекта (например, ручки двери, перил и т. д.), то в месте контакта произойдет искровой разряд. Такие разряды могут быть незаметными или неслышимыми и даже не ощутимыми человеком.

Потенциал 3 кВ для характерной для тела человека емкости в 200 пФ соответствует запасенной энергии 0,9 мДж. Искровой разряд с человека при таком значении энергии способен зажечь газы (смесь водород/воздух — 0,02 мДж), пары (смесь углеводород/воздух — 0,2 мДж) и даже некоторые виды пыли (менее 1 мДж). И, конечно, такие разряды способны повредить незащищенные электронные устройства.

5.3.7 Зажигающая способность электростатических разрядов

5.3.7.1 Общие положения

Если в опасных зонах могут возникать разряды статического электричества, то следует учесть их способность зажигать взрывоопасную среду, в которой они возникают.

5.3.7.2 Искровые разряды

Опасность зажигания искровым разрядом можно оценить путем сравнения затраченной при разряде энергии с минимальной энергией зажигания (МЭЗ) среды, в которой разряд происходит (см. 5.3.2).

5.3.7.3 Коронные разряды

Плотность энергии при таких разрядах обычно не достаточна для зажигания (см. 5.3.3).

5.3.7.4 Кистевые разряды

Пока нет еще никаких доказательств, свидетельствующих том, что даже самая чувствительная пыль (кроме инициирующих взрывчатых веществ) может быть зажжена кистевыми разрядами. Теоретически, такую возможность нельзя отрицать, потому что эквивалентная энергия кистевых разрядов может быть до 4 мДж (см. 5.3.4).

При этом огнеопасные газы и пары могут быть зажжены кистевыми разрядами.

Оценка вероятности появления кистевых разрядов, способных вызвать зажигание газа или пара, может быть сделана по значениям величины заряда в единичных импульсах разрядного тока при кистевом разряде.

Минимальные значения заряда в единичных импульсах разрядного тока при кистевом разряде, способные вызвать зажигание газов и паров различных групп взрывоопасности, оцениваются в соответствии с таблицей 4 IEC TS 60079-32-1:2013 как:

- 60 нКл — для групп взрывоопасности I или IIA;
- 25 нКл — для групп взрывоопасности IIB;
- 10 нКл — для групп взрывоопасности IIC.

В таблице 4 стандарта IEC TS 60079-32-1:2013 указаны вышеприведенные величины передачи заряда как максимально допустимые в Зонах 1 и 2. Для Зоны 0 ограничения снижены с учетом непредвиденных ситуаций и высокого уровня безопасности, требуемого для Зоны 0. Более подробную информацию о группах взрывоопасности и зонах опасных зон можно найти в IEC 60079-10-1 и IEC 60079-10-2.

Примечание — В D.4.2.4 стандарта ISO 80079-36:2016 максимально допустимая величина передачи заряда для взрывоопасной группы IIB указана как 30 нКл. Значение, указанное в IEC TS 60079-32-1:2013, было уменьшено в результате последних исследований с целью выравнивания всех пределов безопасности.

Для регистрации кистевых разрядов, длящихся в течение наносекунд, требуются соответствующие средства измерений. На рисунке 4 приведены два примера. Примеры таких устройств — быстродействующие запоминающие осциллографы (полоса пропускания ≥ 300 МГц, частота дискретизации ≥ 1 Гвыб/с.) с высокочастотным шунтирующим резистором.

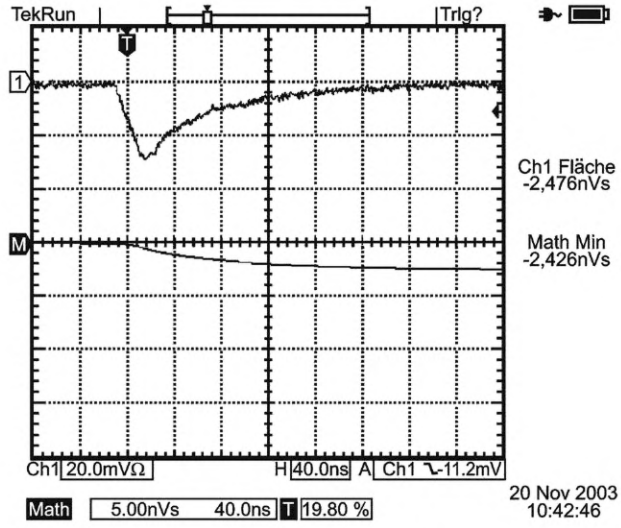


Рисунок 4a) – Слабый разряд < 20 нКл

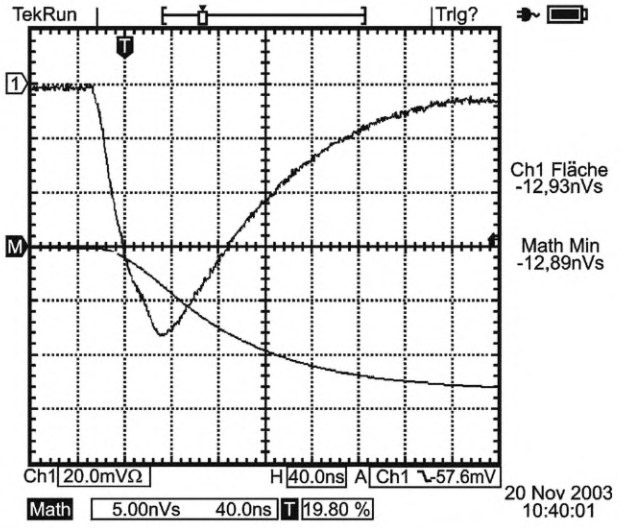


Рисунок 4b) – Сильный разряд > 60 нКл

Рисунок 4 — Эквивалентная электрическая цепь заряжения проводника

Взаимосвязь между переносом заряда при кистевом разряде и вероятностью воспламенения не учитывает пространственное или временно́е распределение энергии в разряде. Эти значения следует рассматривать только как приблизительные и не следует использовать в качестве абсолютного определения безопасности для всех материалов во всех областях применения.

5.3.7.5 Скользящие кистевые разряды

Очевидно, что скользящие кистевые разряды способны зажигать горючие газы и пары, как и большинство видов пыли (см. 5.3.5).

5.3.7.6 Конические разряды

Известно, что конические разряды способны зажигать горючие газы и пары. Следует учитывать, что они могут зажигать и некоторые виды пыли.

5.4 Физиологическое воздействие

Хорошо известно явление, особенно в дни с низкой влажностью воздуха, когда человек электризуется, пройдясь по коврику или поднявшись с сиденья автомобиля, и при прикосновении к электропроводящим объектам ощущает электрический удар.

Уровни восприятия людьми электростатического заряда и ответной реакции приведены в таблице 3.

Изолированный человек может зарядиться до высоких значений потенциала, особенно при обращении с сильно заряженными объектами. Примеры таких ситуаций включают:

- процесс заправления постели: покрывала заряжены и человек приобретает индуцированный потенциал, который нейтрализуется при искровом разряде в момент соприкосновения с проводящим объектом;
- упаковку и распаковку в случае применения хорошо электризующихся упаковочных материалов.

Таблица 3 — Уровни восприятия людьми электростатического заряда и ответной реакции при емкости тела в 200 пФ

Энергия разряда, мДж	Реакция	Потенциал тела, В
0,1	Разряд ощутим	1000
0,9	Четко ощутим	3000
6,4	Неприятный шок	8000

Человек может почувствовать такое же воздействие, прикоснувшись к заряженному объекту.

Примеры таких ситуаций включают:

- одевание и снимание свитера: свитер сильно заряжен и этот заряд передается на человека (кистевые разряды);
- тележка с изолированными пластмассовыми колесами зарядилась при движении, и касание корпуса может вызвать неприятный шок.

5.5 Моделирование электростатических разрядов

5.5.1 Общие положения

Разряды статического электричества обычно моделируются простой электрической схемой, в которой электростатический заряд накапливается при заряде емкости конденсатора до определенного напряжения. Когда требуется моделирование разряда, запасенная электростатическая энергия разряжается через электрическую цепь на нагрузку, которой может быть искровой разряд или испытуемое электронное устройство. Разряд обычно характеризуется параметрами, относящимися к форме волны тока *I*, хотя запасенная перед разрядом электростатическая энергия также может быть важным параметром.

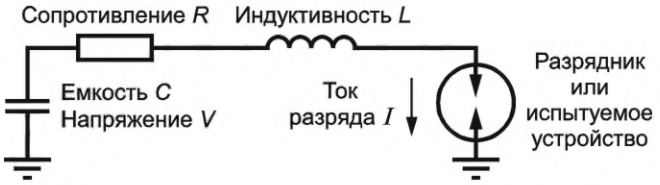


Рисунок 5 — Принципиальная схема для моделирования электростатических разрядов

Эта упрощенная модель цепи позволяет получать для различных целей широкий варьируемый диапазон формы волны, в зависимости от значения емкости *C*, сопротивления *R* и индуктивности *L*. Такие компоненты существуют в любой электрической цепи, хотя практически некоторые из них могут присутствовать как непредусмотренные, но неизбежные «паразитные» компоненты. Во многих цепях малые «паразитные» компоненты могут иметь существенное влияние на конечную моделируемую форму волны, получаемой на выходе.

Получаемый на выходе ток вычисляют по формуле

$$I = \frac{V_0}{2 \cdot L \cdot \omega} \cdot \left[e^{-(\sigma+\omega)\cdot t} - e^{-(\sigma-\omega)\cdot t} \right], \tag{6}$$

где

$$\sigma = \frac{R}{2 \cdot L} \tag{7}$$

и

$$\omega = \left[\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C} \right]^{0,5}. \tag{8}$$

Если ω — действительное число, то цепь дает униполярную форму волны, как правило, с крутым передним фронтом и последующим длительным экспонентным затуханием.

Если $\omega = 0$, то цепь критически заглушена, и формируется короткий униполярный импульс. Если ω — комплексное число, то форма волны — убывающая «циклическая» синусоида.

5.5.2 Емкостные разряды для определения энергии зажигания

Цепи с разряжающейся емкостью обычно применяют при определении энергии зажигания горючих смесей. В типовой схеме применяется компонент емкости для задания определенной энергии. Сопротивление цепи *R* и индуктивность *L* обычно находятся на уровне «паразитных» значений.

Во многих случаях определяемым параметром служит запасенная перед разрядом энергия, а не форма получаемой волны тока разряда. Как правило, форма получаемой волны — убывающая синусоида.

В некоторых случаях в цепь могут быть включены индуктивность *L* или сопротивление *R*, например, в установках для определения минимальной энергии зажигания пыли, где часто включается индуктивность 1 мГн. Типичные значения представлены в таблице 4.

5.5.3 Модель человеческого тела

Важное значение отводится модели электростатического разряда, имитирующей разряд с наэлектризованного человека на испытуемое устройство или на систему и называемой моделью человеческого тела (МЧТ). Эта модель обычно используется и для того, чтобы проверить чувствительность к воздействию ЭСР электронных компонентов и систем в процессе их производства или эксплуатации. Эту модель также применяют в других ситуациях, где могут возникнуть разряды статического электричества тела человека, например, в оценке чувствительности к зажиганию пиротехнической пыли.

В этом случае емкость С выбирают такой, чтобы быть типичной для диапазона значений человеческого тела. Сопротивление *R* включено в цепь, но индуктивность *L* остается в пределах неконтролируемых «паразитных» значений. Получаемая волна имеет униполярную форму с крутым передним фронтом и медленно убывающим последующим значением тока. Типичные значения параметров представлены в таблице 4.

5.5.4 Механическая модель

Механическую модель (ММ) применяют для симуляции разряда с больших металлических объектов, таких как узлы и части машин. Эта модель больше не применяется при определении чувствительности электронных компонентов к ЭСР.

В этом случае обычно задаются емкость С, индуктивность *L* и форма получаемой волны. Типичная форма волны — циклическая синусоида заданной частоты, длительности и амплитуды. Типичные значения параметров представлены в таблице 4.

5.5.5 Модель заряженного устройства

Модель заряженного устройства (МЗУ) моделирует ситуацию, когда ЭСР происходят при сближении небольшого наэлектризованного устройства или объекта с заземленной поверхностью, в результате которого происходит ЭСР. Модель применяют при испытании чувствительности электронных устройств к воздействию ЭСР. Как правило, в устройстве применена малая емкость, а индуктивность *L* и сопротивление *R* ограничены на уровне «паразитных» значений. Модель обычно формирует волну, характерную для очень короткого и быстро протекающего униполярного разряда. Типичные значения параметров представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Типичные значения, используемые при моделировании ЭСР

Модель	Область применения	*R*, Ом	*C*, пФ	*L*, нГн
Определение энергии зажигания	Зажигание облака пыли	Паразитное значение	5—1000	Паразитное значение или 1 мГн
	Зажигание пара	Паразитное значение	5—1000	Паразитное значение
Модель человеческого тела (МЧТ)	Испытание электронного устройства	1000—3000	100—300	Паразитное значение

Окончание таблицы 4

Модель	Область применения	*R*, Ом	*C*, пФ	*L*, нГн
Механическая модель (ММ)	Испытание электронного устройства	8,5 (типично)	200	0,5 (типично)
Модель заряженного устройства (МЗУ)	Испытание электронного устройства	<10 (типично)	3—30 (типично)	<10 (типично)

6 Основные решения проблем и защита от опасных явлений

6.1 Общие положения

В то время как выявление проблем, связанных со статическим электричеством, не было целью настоящего стандарта, краткий обзор их решения необходим в качестве введения в описание методов измерения соответствующих параметров, связанных со свойствами материалов. Проблемы, связанные со статическим электричеством, определяются спецификой производства, процессов или материалов и обстоятельств. Измерение электростатических параметров — первостепенная необходимость, предшествующая принятию эффективных решений.

Описание порядка обращения с компонентами, чувствительными к воздействию электростатических разрядов, приведено в IEC 61340-5-1 и IEC TR 61340-5-2, а защита от опасных проявлений статического электричества в IEC TS 60079-32-1. Электростатический контроль при оказании медицинских услуг приведен в IEC 61340-6-1. Общий обзор представлен в 6.2.

6.2 Основные подходы

Во многих случаях необходимо определить область, в которой необходимы специальные предосторожности. Это может быть участок защиты от ЭСР при производстве электроники или взрывоопасная зона в промышленности. Для всего персонала, работающего на этих участках, необходимо понять потребность в электростатическом контроле на границах участков и мерах защиты, которые должны быть соблюдены на этих участках.

Первый принцип — исключить применение изоляционных материалов и гарантировать, что все проводящие материалы или предметы из металла заземлены. Если электризация неизбежна, что случается наиболее часто, степень заряженности можно иногда ограничить путем снижения числа соприкосновений и последующих исключений контактов. Это достигается предотвращением трения твердых материалов и снижением линейной скорости жидкостей. Ионизация коронным разрядом — очень полезное средство сокращения нежелательной поверхностной плотности зарядов на изолирующих поверхностях. В электронной промышленности для нейтрализации электростатических зарядов используют устройства, которые основаны на этом принципе и в которых применяют острые (игольчатые) заземленные электроды.

Поскольку накопление электростатических зарядов существенно зависит от влажности воздуха, влияющей на влажность поверхностей, общее решение получить более низкие уровни заряженности сводится к стремлению поддерживать влажность воздуха настолько высоко, насколько это возможно в отношении других рисков. Например, в электронной промышленности относительная влажность воздуха поддерживается в пределах от 40 % до 60 %. Для большинства случаев использование высокой относительной влажности не основная, а только вторичная мера защиты от опасных проявлений статического электричества.

Интенсифицировать скорость стекания зарядов с изоляционного материала на землю можно применением антистатической добавки.

Для твердых изоляторов обычно практикуют применение проводящей матрицы в материале добавлением углерода или металлических частиц, пластин или волокон. При этом следует учесть, что эти системы эффективны только тогда, когда во всей матрице выдерживается электрическая непрерывность и, следовательно, такие системы чувствительны к механическим воздействиям и изменениям температуры. Кроме того, в данном контексте они могут создать проблему для проведения измерений.

Заряд вообще не может мигрировать с изолятора к проводящей матрице и, таким образом, характеристики рассеивания или проводимости существенно различаются в зависимости от того, какой заряд рассматривается: заряд в объеме или на поверхности. Эти различия в применяемых методиках следует тщательно учитывать при проведении любого испытания.

Проблемы статического электричества в основном возникают там, где материал является электрическим изолятором, или там, где нет хорошего контакта с землей. Типичный пример — пневмотранспорт сыпучих материалов, когда даже металлические частицы сохраняют заряд, если они находятся во взвешенном состоянии в воздухе. В этом случае, снижение либо полную нейтрализацию зарядов на материале может обеспечить ионизация окружающей среды.

Накопление металлической пыли на активных ионизаторах может привести к опасным искрам. Поэтому при обращении с металлической пылью рекомендуется использовать пассивные или радиоактивные ионизаторы. Для обеспечения безопасности и эффективности применения пассивных и активных ионизаторов важно в соответствии с инструкциями изготовителя проводить их регулярную чистку и проверку исправности.

Одна из наиболее распространенных проблем — незаземленные проводники. Часто мелкие металлические объекты или детали в сборке могут накапливать заряды и стать источником возникновения зажигающих или вызывающих повреждения разрядов. Предпочтительно заземлять такие объекты и предотвращать накопление на них зарядов.

Потенциально заряженный незаземленный металлический или токопроводящий предмет никогда не следует заземлять в присутствии легковоспламеняющейся среды. Это приводит к риску возникновения разряда, способного стать источником зажигания взрывоопасной среды.

Очень важно, чтобы персонал, работающий во взрывоопасных зонах или с электронными системами, чувствительными к воздействию разрядов, не мог бы оказаться электростатически заряженным. Там, где необходимо обеспечить соблюдение данного требования в производственных условиях, это достигается заземлением персонала посредством проводящих браслетов, применением проводящего пола и проводящей обуви, в зависимости от того, что больше подходит для конкретной промышленной среды.

Пол должен быть достаточно чистым, и его состояние должно регулярно контролироваться, иначе не будет осуществляться заземление через пол и обувь.

Для защиты чувствительной электроники, особенно во время транспортирования, рекомендуется использовать экранирующую упаковку, защищающую от воздействия электрических полей и прямых электростатических разрядов, возникающих вне упаковки. Упаковочный материал, контактирующий с устройством, не должен быть диэлектриком, чтобы исключать существенную электризацию упаковки или устройства.

7 Полезные применения электростатических явлений

Широко распространенные фотокопировальное устройство и струйный принтер — устройства, чрезвычайно важные в информационной технологии. Электрографический процесс полностью основан на электростатических эффектах, и струйный принтер использует точное распределение точно отмеренных и заряженных капель чернил. В первичном процессе оптическое изображение преобразовано в заряженный коронным разрядом контур на заряженном фотопроводнике, который впоследствии проявляется вследствие притяжения частиц с противоположным зарядом. Заключительный этап — передача изображения на бумагу — снова осуществляется в электростатическом поле.

Заряженные коронным разрядом частицы пыли, электрические свойства захватываемых и переносимых слоев пыли и стабильные высокие электрические поля — все это способствует эффективности электростатического осаждения.

Окраска в электростатическом поле, ворсование, обогащение руды и разделение пластмасс — все это или уже применяемые, или развивающиеся производственные процессы. Конечно, возможности осуществления, управления и практического применения электростатических эффектов кардинально зависят от количественных данных об электростатических параметрах и о соответствующих свойствах материалов. Дополнительно можно отметить применение статического электричества в печатном деле, при электростатическом увлажнении и электростатическом промасливании.

8 Общие аспекты измерений

8.1 Общие положения

Измерения позволяют понять электростатические явления, проанализировать и выработать решения проблем, спроектировать и разработать системы и устройства, основанные на электростатических процессах.

В этом разделе представлено описание основных методов измерений, которые обеспечивают однозначность и достаточную точность получаемых данных. Наиболее важна правильная интерпретация данных, и она может быть получена только при понимании основных явлений и влияния на них локальных условий.

Некоторые электростатические измерения имеют отношение непосредственно к основным физическим параметрам, например к электрическому полю, заряду, поверхностной и объемной плотности зарядов, удельному сопротивлению, емкости, току и энергии. Другие измерения более специфичны и востребованы в методиках испытаний, в которых моделируются практические ситуации, геометрические параметры и размеры. Такие примеры связаны с заряжаемостью, стеканием заряда, сопротивлением заземлителя и способностью к экранированию.

При измерении электростатического заряда и поля не требуется особо высокой точности. Во многих случаях достаточно определить порядок значения измеряемой величины. Необходимы надежность и уверенность в том, что в пределах приемлемой точности сделанные наблюдения реальны и правильны. Есть случаи, когда высокая разрешающая способность и стабильность могут быть необходимы, например при оценке скорости стекания заряда с изолирующего материала при коротких значениях времени наблюдения, когда поверхностный заряд и потенциал могут быть высокими, а темп их изменений очень медленный.

Есть случаи, когда необходима высокая чувствительность, например для того, чтобы измерить низкие потенциалы, которые могут представить риски для чувствительных полупроводниковых устройств и для того, чтобы измерить поверхностную плотность зарядов на отдельных сторонах тонких пленок. Есть также некоторые случаи, когда может быть необходима высокая точность, например там, где измеряют различия между двумя или большим числом измерений электрического поля, например при измерениях в режиме реального времени плотности зарядов или скорости стекания заряда.

Представленные методики касаются, прежде всего, правильности метода, а не достижения высокой точности. Предисловие к каждому из представленных методов призвано разъяснить некоторые из трудностей и обеспечить их правильное выполнение и однозначную интерпретацию результатов.

8.2 Электрическое поле

8.2.1 Общие положения

Измерения электрического поля проводят с применением приборов двух типов: индукционных датчиков и датчиков роторного типа.

В индукционных датчиках есть чувствительная поверхность, подключенная к усилителю с высоким входным сопротивлением и через конденсатор к земле. Такие приборы простые и относительно дешевые, но их чувствительность и возможности применения ограничены. У них есть конечная инерционность, и это означает, что они могут использоваться только для относительно краткосрочных измерений (десятки секунд) после установки нуля в окружающей среде, в которой отсутствует электрическое поле. Их показания неточны при измерении в присутствии ионизированного воздуха.

Датчики роторного типа названы так потому, что снабжены вращающимся заземленным затвором, модулирующим поток электростатического поля на чувствительной поверхности. Получаемый переменный сигнал зависит только от площади чувствительной поверхности и значения емкости на входном конденсаторе до тех пор, пока скорость изменяемого наблюдаемого электрического поля соответственно выше, чем входная постоянная времени. При этом период модуляции должен быть короче времени релаксации входной цепи. Фаза чувствительного элемента формирует выходной сигнал, соответствующий напряженности и полярности наблюдаемого электрического поля.

В альтернативном приборе применяют вибрирующий экран, модулирующий поток электростатической индукции к чувствительной поверхности. В таких приборах напряжение обычно подается обратно на вход, поэтому прибор работает в режиме нулевой модуляции. Это особенно подходит при слежении за напряженностью поля.

8.2.2 Применение

Измерение электрического поля может предоставить информацию о величине и полярности потенциала поверхности, поверхностной или объемной плотности зарядов или о локальном потенциале в определенной точке пространства.

Индукционный датчик непрерывно реагирует на наблюдаемые поля. Измеренное поле отражает результат относительно предыдущих наблюдавшихся полей и, таким образом, важно, чтобы такой датчик вначале включали или в нулевом положении, или в области, где поле отсутствует, а измерения выполняли непосредственно или в пределах относительно короткого промежутка времени после переустановки нуля. Показания датчика роторного типа не зависят от условий его включения, поскольку нуль остается устойчивым в течение всего времени проведения измерений.

Важно, чтобы датчик был должным образом соединен с заземлением и чтобы соблюдалась стабильность установки нуля в промежутках времени, необходимых для проведения измерений. Следует также контролировать присутствие других заземленных поверхностей в области проведения измерений.

Поверхности в области проведения измерений должны содержаться в чистоте. Это особенно важно при высокой чувствительности приборов и при работе в среде с наличием частиц изолирующих материалов. Такие частицы легко становятся заряженными, и их наличие может сместить нуль датчика. Очистка воздуха помогает предотвратить наличие таких частиц, но это не исключает необходимость регулярной переустановки нуля.

Нулевое положение показаний датчика роторного типа может быть проверено с помощью его экранирования заземленной металлической пластиной.

Индукционный датчик или датчик роторного типа своим присутствием искажают электрическое поле. Кроме того, показания датчика отражают интегральное значение поля или потенциала в неопределенной области (точке) пространства. Эти эффекты могут быть существенными и должны быть учтены.

8.3 Потенциал

8.3.1 Общие положения

Потенциалы могут быть на объектах, на заряженных поверхностях или в объемах, содержащих объемные заряды. Первые могут быть измерены электростатическим вольтметром, но все они могут быть определены измерителями поля относительно земли или установленной нулевой точки для датчика. При таких измерениях не должно происходить искажений ни в распределениях электрических зарядов, ни в значениях параметров электрического поля на испытуемой поверхности, поскольку это может изменить распределение присутствующего заряда.

8.3.2 Напряжение на поверхности

При измерении электростатическим вольтметром датчик предпочтительно располагать непосредственно у поверхности так, чтобы никакие другие смежные заряды не могли бы влиять на результат измерения. Главные ограничения возникают в связи с трудностью перекрытия большого диапазона значений потенциала и риска возникновения пробоя, когда скорость изменения потенциала превышает инерционность считывания показаний прибора. Преимущества: высокая точность измерений потенциала, широкий диапазон измеряемых значений и низкая емкость измерительного датчика.

Прибор для измерения поля, соединенный перемычкой с заземлением, может использоваться в качестве вольтметра и может измерять поверхностный потенциал даже при очень высоких напряжениях. Расстояние, разделяющее измерительный прибор и объект измерения, должно быть известным и достаточно большим, чтобы избежать увеличения емкости измерительной системы и снижения измеряемого потенциала. При этом расстояние не должно быть слишком большим, чтобы исключить влияние других зарядов или заземленных поверхностей.

Предосторожности:

- электрическое поле между поверхностью или телом и прибором для измерения поля обычно неоднородно, а поверхностный потенциал получают путем умножения наблюдаемого значения напряженности поля E (В/м) на расстояние l (м) между прибором и объектом измерения и на поправочный коэффициент, который зависит от предусмотренной методики измерений. При измерении поля у большой плоской проводящей поверхности электрическое поле однородно и поправочный коэффициент может быть получен при градуировке самого прибора. Для некоторого выравнивания поля датчик прибора дополняют специальной пластиной. Эта пластина позволяет только незначительно скорректировать неоднородность поля. При переносных измерениях легче использовать прибор без пластины;

- если поверхность — небольшая плоскость, то необходимо установить соотношения между электрическим полем, расстоянием от поверхности до датчика и потенциалом. Это может быть сделано или опытным путем, или компьютерным моделированием;

- при изучении рисков, связанных со статическим электричеством, в сложных рабочих пространствах следует с помощью прибора для измерения параметров поля, прежде всего, идентифицировать все существенные источники заряжения. Отдельные поверхностные потенциалы могут быть измерены, возможно, с экранированием других смежных источников поля. Такой подход позволяет исключить наложение на значения потенциалов поверхности других более значительных смежных источников зарядов;

- во время проведения измерений при наличии поверхностей из диэлектрических материалов следует учитывать, что такие материалы прозрачны для электрических полей. Эффективная локация источников зарядов может быть выполнена путем перемещения приборов от места к месту.

8.3.3 Потенциал в пространстве

Локальный потенциал в пространстве можно измерить приборами для измерения электростатического поля. Заземленный прибор возмущает поле потенциалов в зависимости от диаметра датчика. Напряженность поля E, В · м$^{-1}$, связана с локальным потенциалом V, В, и диаметром датчика d, м, и вычисляется по формуле

$$E = f \cdot \frac{V}{d}, \tag{9}$$

где f — константа, приблизительно равная 1. Эти соотношения сохраняются при удаленности датчика на несколько его диаметров от смежных заземленных поверхностей и конструкций. Это можно проверить с помощью измерителя поля на батарейках и повысить его до потенциала, при котором показания электрического поля равны нулю, то есть используя его в качестве преобразователях напряжения.

Необходимо проверить, чтобы при введении датчика в электростатическое поле не провоцировалось возникновение коронных или искровых разрядов.

8.4 Заряд

Свободный заряд статического электричества на изделии или на материале может быть измерен при помещении этих объектов в замкнутую проводящую камеру, известную как цилиндр или клетка, или камера Фарадея, а индуцированный на ней заряд на наружной поверхности измеряется посредством электрометрического усилителя. Альтернативным способом измерения увеличения напряжения на клетке Фарадея, зависящего от ее емкости, может быть применение измерителя электростатического поля или измерение интегрального тока на землю.

При работе с чувствительными электрометрическими устройствами следует обеспечить их высокое входное сопротивление, устранение шума от любого соединительного кабеля и сведение к минимуму входных токов смещения. При проведении измерений увеличения напряжения с применением цилиндра Фарадея следует позаботиться о том, чтобы его емкость многократно превосходила емкость наэлектризованных объектов измерения. При таком простом подходе предоставляется возможность проведения измерения зарядов до 1 пКл. При проведении измерений больших зарядов в промышленных условиях важно обеспечить безопасность. Для этого может применяться способ измерения заряда по величине интегрального значения тока и расположение цилиндра Фарадея непосредственно у земли.

Практические рекомендации проведения измерений:

- цилиндр Фарадея должен быть достаточно большим, чтобы полностью вмещать и охватывать пару заряженных объектов так, чтобы ни один участок поверхности не оказался снаружи;
- должно быть обеспечено хорошее экранирование цилиндра Фарадея, защищающее его от влияния любых зарядов во внешней окружающей среде;
- следует предотвратить влияние любых локальных зарядов в процессе измерения заряжения. Для этого, например, требуется заземлять оборудование, когда оператор помещает объекты измерения в цилиндр Фарадея, и гарантировать, что оператор также заземлен и что его одежда ненаэлектризована и не может наэлектризоваться в процессе проведения измерений;
- следует предотвратить утечку зарядов через изоляцию цилиндра Фарадея, электрических соединений и проводов внешних измерительных цепей;

• следует удостовериться, что и нулевые показания, и показания, касающиеся величины измеряемого заряда, сохраняются устойчиво в течение времени, достаточного для снятия показаний измерительных приборов.

Безопасность должна также быть обеспечена и на тот момент, когда заряженный цилиндр Фарадея заземляется. При этом не должно возникать искровых разрядов, способных вызвать зажигание.

8.5 Плотность зарядов

8.5.1 Поверхностная плотность зарядов

Заряженный лист изоляционного материала, удаленный от любых других заземленных поверхностей, служит источником однородного одинакового и направленного нормально к поверхностям каждой стороны листа электрического поля, обусловленного алгебраической суммой поверхностных плотностей зарядов на каждой из его сторон. Плотности зарядов на каждой стороне листа могут быть измерены, если лист соприкасается с заземленной поверхностью. Заряд на поверхности, касающейся заземленной поверхности, не окажет влияния на внешнее поле у противоположной поверхности листа, и плотность зарядов на последней поверхности может быть измерена, например, прибором для измерения напряженности поля. При этом толщина и относительная диэлектрическая постоянная материала и точное расстояние датчика от поверхности должны быть известны.

Чтобы обеспечить требуемую точность измерений до 5 %, датчик измерительного прибора должен быть удален от поверхности листа на расстояние не менее чем 1,5 диаметра датчика. Размер защитной пластины должен не менее чем в 9 раз превышать расстояние, отделяющее датчик от поверхности листа. Для обеспечения точности измерений до 1 % размер защитной пластины должен не менее чем в 15 раз превышать расстояние, отделяющее датчик от поверхности листа.

При мелкомасштабных объектах испытаний требуется применять датчики и расстояния, разделяющие датчик и объект испытаний, соразмерные объекту испытаний.

Для проведения измерений на движущихся объектах требуются измерительные приборы с достаточно высокой скоростью реагирования по сравнению со скоростью движения и разрешающей способностью, достаточной для обнаружения любых изменений в структуре заряда на поверхности.

8.5.2 Объемная плотность зарядов

Для сферического пробоотборника и однородного распределения зарядов электрическое поле на поверхности и максимальный потенциал в пространстве связаны со средней плотностью зарядов линейной и квадратичной зависимостью, соответственно. Следовательно, при однородном распределении заряда плотность электрического заряда в объеме можно определять по напряженности электрического поля у поверхности или по максимальному потенциалу в камере простой формы в определенных условиях.

Для камер пробоотборника сложной формы можно применить компьютерное моделирование, чтобы получить распределение заряда на поверхности и распределение потенциала по объему.

Камера пробоотборника может быть как единым объемом заряженной среды, так и небольшим пробоотборником, помещенным в среду. Требуется аккуратность, чтобы сбалансировать заряженность среды и экранирование электрического поля, создаваемого зарядами на поверхности камеры. Влияние экранирования можно оценить, когда в объеме отсутствуют заряды, путем внутренних измерений при повышенном потенциале камеры. Воздействие внешних полей может быть довольно существенным, если пробоотборник помещен в центральную часть мощного распределенного заряда, где локальный потенциал может достигать нескольких десятков киловольт.

8.6 Стекание заряда

Стекание заряда с материалов — фактор контроля электростатических эффектов. Следовательно, измерение скорости естественного стекания заряда — важный параметр. Свойства, связанные со стеканием зарядов, характеризуются временем стекания заряда.

Традиционно электропроводность материалов и, следовательно, их способность обеспечивать стекания зарядов оценивается данными измерений объемного или поверхностного удельного сопротивления. Это может быть удовлетворительной характеристикой для гомогенных материалов. К сожалению, многие материалы не являются гомогенными, и у многих проявляется зависимость удельного сопротивления от направления приложенного напряжения. Так как электростатические заряды возникают на поверхностях при контакте или при трении, лучший способ оценить свойства материалов со-

хранять заряды состоит в нанесении заряда на материал и последующем наблюдении за скоростью его стекания.

Зарядить материал трением очень просто, и это практичный способ заряжения поверхностей твердых материалов. Этот метод обладает и тем преимуществом, что при нем воспроизводятся реальные условия. Однако заряжение данным способом может оказаться плохо воспроизводимым. Порошки, гранулы и хлопья материала могут быть легко заряжены при моделировании реальных условий осаждения или транспортирования потоком.

Коронный высоковольтный разряд часто применяют для заряжения материалов или поверхностей. Это простой и универсальный способ заряжения. Метод применим при обращении с твердыми поверхностями, порошками или гранулами и жидкостями.

Проводящие и рассеивающие материалы или объекты с удельным сопротивлением около 10^{11} Ом и менее могут заряжаться по индукции или при прямом контакте с источником высокого напряжения.

Обычный метод наблюдения стекания зарядов основан на применении прибора для измерения напряженности поля у поверхности и снятия характеристики его убывания.

Материалы или поверхности объектов, которые должны обеспечивать стекание заряда, могут быть проверены по убыванию напряжения на заряженной металлической пластине, лежащей на испытуемой поверхности.

Скорость стекания зарядов для многих изоляционных материалов в большой степени зависит от плотности зарядов — чем выше плотность зарядов, тем быстрее происходит их стекание. Очень быстрая в начальный период скорость стекания зарядов может затем существенно замедляться, поскольку плотность зарядов уменьшается. Поэтому лучший способ интерпретировать скорость стекания — сравнение с известным материалом.

Что касается количества заряда, остающегося, например, на сыпучем материале при его хранении, то такая характеристика особенно важна. В динамических процессах электризации, таких как пневмотранспорт материала, важный фактор — чистота изолирующих поверхностей, контактирующих с продуктом.

Площадь и плотность заряда, а также близость заземленных поверхностей будут влиять на электрические поля, приводящие к перемещению заряда. Поэтому в идеале скорость стекания заряда необходимо измерять в двух экстремальных условиях, чтобы оценить влияние близлежащих заземленных поверхностей. Контакт с фланцами способствует преимущественно стеканию по поверхности, в то время как контакт с металлической опорной пластиной — стеканию через объем. Для материалов, применяемых в монтаже, конечно, необходимо наблюдать стекание зарядов в условиях существующих заземленных узлов установки.

Необходимо минимизировать обращение с материалами, вносящее любые изменения в свойства их поверхностей. Порошки должны быть помещены в подходящий контейнер.

8.7 Сопротивление и удельное сопротивление

Электрическое сопротивление — физический параметр с наибольшим диапазоном, охватывающим значения, отличающиеся свыше, чем приблизительно на 30 десятичных порядков, от металлов до почти идеальных диэлектриков. Сопротивление и удельное сопротивление твердых объектов и жидкостей измерялись в течение многих лет, большое количество методов измерения описано в литературе и в стандартах. Очевидно, что никакой единственный метод не применим по целому диапазону значения измеряемых величин, но в области электростатики будут, вероятно, достаточны в большинстве случаев методы, при которых образец просто помещают между парой электродов и измеряют ток при заданном напряжении. Сопротивление поверхности одного и того же самого материала может значительно отличаться из-за абсорбции загрязнений, особенно воды. Поэтому ясно, что для измерений потребуются разные системы электродов, но принцип измерений остается одним и тем же.

Для материалов с хорошими изоляционными свойствами при постоянном электрическом поле наблюдается непрерывное уменьшение тока (или увеличение сопротивления). Кроме того, для этих материалов ток может увеличиваться нелинейно по мере увеличения напряжения. Эти факторы делают концепцию удельного сопротивления несовершенной и затрудняют интерпретацию экспериментальных наблюдений. Общая практика состоит в том, что для таких материалов с высокими изоляционными свойствами устанавливаемое значение сопротивления регистрируется после предусмотренной выдержки определенного времени.

В практике иногда требуется проведение измерений сопротивления от поверхности смонтированной конструкции до заземлителя здания или сопротивления защитной обуви. В таких случаях действует принцип, в соответствии с которым система электродов должна, по возможности, точнее соответствовать реальным условиям.

Важно, чтобы был установлен хороший контакт между электродами и образцом. Поэтому часто применяют мягкие электрически проводящие материалы или металлическую фольгу в сочетании с мягким материалом. Для жидкостей и порошков требуются специальные измерительные ячейки. В тех случаях, когда сопротивление продукта того же порядка, что и сопротивление изолирующих деталей измерительной ячейки, требуются защитные электроды, отсекающие паразитные токи. При заполнении измерительной ячейки порошками требуется, чтобы применялся метод, обеспечивающий его высокую плотность.

8.8 Способность накапливания заряда (заряжаемость)

Часто необходимо измерить заряжаемость, чтобы оценить токи, которые могут возникнуть при проведении операций или при обращении с определенными продуктами. В некоторых случаях чем больше затраченная работа, тем больше заряд. Например, при размоле заряд больше, чем при просеивании порошка, при прокачке жидкости через фильтр заряд больше, чем при ламинарном течении. Другие часто встречающиеся случаи электризации: трение материала, перемещение по ленточным транспортерам, пневмотранспорт, трубопроводный транспорт жидкостей, хождение людей по изолирующим покрытиям пола.

Заряд, образующийся на определенном компоненте, может быть измерен непосредственно с применением цилиндра Фарадея или косвенно по данным измерений полей потенциала или напряженности, соответствующих этому заряду. Из-за равенства зарядов на испытуемой поверхности и на трущемся материале есть возможность выбора, какой из них измерять.

При измерениях должны использоваться новые материалы, чтобы исключались искажения, вызванные загрязнением.

Разделение зарядов может сопровождаться их утечкой. Между разделяющимися телами происходят разряды. Измеренный заряд — результат баланса процессов электризации и разряжения. Следовательно, заряд должен быть измерен непосредственно сразу после его образования. Например, текучие испытуемые продукты должны сразу поступать в цилиндр Фарадея измерительной системы.

Внешние электрические поля могут влиять на процесс разделения зарядов, так что измерения должны выполняться в условиях экранирования от внешних полей.

8.9 Ток

Есть несколько областей, в которых в электростатике уместны измерения тока. Очень маленькие токи, меньше нескольких нА, обусловлены электропроводностью изоляторов. Токи более высоких значений, порядка микроампер, возникают в потоках, а токи, измеряемые в амперах, — в разрядах статического электричества. Доступные коммерческие электрометры обеспечивают возможность измерения тока в первых двух случаях, а альтернативный метод измерения тока по потенциалу заряжающегося конденсатора известной емкости приемлем во всех трех случаях. Что касается токов искровых разрядов, то важно, чтобы весь заряд прошел через шунт с малым сопротивлением. Важно также, чтобы падение напряжения на шунте было несоизмеримо мало в сравнении с напряжением источника. Реактивный импеданс шунта должен быть незначительным по сравнению с его активным сопротивлением, чтобы падение напряжения на шунте было точной мерой протекающего по нему тока. Инерционность измерительной системы должна быть много меньше минимальной длительности разряда, подлежащего измерению. При разрядах с проводящих тел инерционность приборов должна быть 1 нс или менее.

Необходимо, чтобы максимальные значения напряжения на измерительной системе и применяемые средства ее заземления, применяемые во взрывоопасной среде, не приводили бы к возникновению искровых разрядов.

Оптимальный способ обеспечить низкую индуктивность состоит в том, чтобы сформировать, например, шунтирующее входное сопротивление в 1 Ом из 10 параллельных сопротивлений, каждое по 10 Ом. Чтобы достичь низкого реактивного импеданса шунта для частот до 1 ГГц, полезен поверхностный монтаж резисторов. При применении кабеля с собственным волновым сопротивлением 50 Ом для соединения датчика с прибором следует соблюсти условие, при котором входное и выходное сопротивления кабеля были бы равны 50 Ом. Большие требования предъявляются к качеству заземления и

экранирования из-за необходимости исключить искажения результатов измерения в связи с переходными процессами. Полезно проверить, не возникают ли сигналы в случае разряда непосредственно на заземленную поверхность, а не на датчик.

8.10 Энергия емкостных разрядов

Определение энергии, реализованной в разряде, важно для оценки возможности повреждения чувствительных устройств и инициирования смесей с воздухом горючих веществ и материалов. В настоящее время нет общепринятого метода для прямого измерения этой энергии. Самый общий способ определить энергию, запасенную заряженным объектом, — путем измерения напряжения V и емкости C и расчета энергии по формуле $0{,}5 \cdot CV^2$. Воздействие разряда принято оценивать по энергии такого конденсатора, запасенной перед разрядом. Метод испытания воздействия такого разряда на электронное оборудование приведен в IEC 61000-4-2. Метод определения минимальной энергии зажигания пылевоздушных смесей приведен в ISO/IEC 80079-20-2.

8.11 Энергия зажигания

8.11.1 Общие положения

Энергия, требующаяся для зажигания газов или пылевоздушных смесей, снижается при включении сопротивления или индуктивности в цепь разряда емкости, увеличивающей длительность разряда. Обычно испытания проводят без включения дополнительных индуктивностей в цепь разряда. Минимальную энергию зажигания (МЭЗ) смесей газов или пыли с воздухом находят путем проведения серии испытаний, в ходе которых последовательно, пока не прекратятся зажигания, снижают энергию, запасенную в конденсаторе перед разрядом, воздействующем на смесь. Порошок импульсом сжатого воздуха рассеивают в промежутке между электродами, между которыми с задержкой в несколько миллисекунд образуется искровой разряд. Для получения итогового результата каждый раз требуется многократное повторение большого количества операций. Метод определения минимальной энергии зажигания пылевоздушных смесей приведен в ISO/IEC 80079-20-2.

Оптимальный метод оценки зажигающей способности разрядов с заряженных поверхностей состоит в обеспечении разрядов на заземленный сферический электрод, расположенный в глубине открытого стакана из изолирующего материала, заполненного смесью известного состава горючего газа с воздухом. Данное устройство называется датчиком воспламенения. Факт зажигания смеси, в которую погружен электрод, служит прямым показателем зажигающей способности исследуемых разрядов статического электричества. Зажигающая способность разряда тем больше, чем больше энергия зажигания смеси, которая способна загораться от его воздействия. В одинаковых условиях испытания зажигающая способность разрядов с отрицательно заряженной поверхности больше, чем с поверхности, заряженной положительно. Факт появления зажигания при проведении испытания свидетельствует о реальности риска зажигания. Зажигание — статистический процесс, и требуется большое количество испытаний, в которых зажигание отсутствует, чтобы утверждать, что риск зажигания мал.

Напряжение следует измерять до и после разряда, т. к. энергия может быть израсходована не полностью.

Эффективность воздействия искровых разрядов статического электричества может сильно изменяться с увеличением периодичности и длительности. Рост периодичности искровых разрядов между металлическими проводниками в воздухе точнее наблюдается при более низких напряжениях, а при сближении электродов еще более точнее, чем в стабильных разрядных промежутках. В принятых в МЭК испытаниях применяют как искровые разряды при сближении электродов в цепях, чувствительных к их воздействию, так и контактирующие электроды, применяемые при формировании волны тока заданной формы. Кратковременные значения тока должны быть больше при непосредственном контакте и, следовательно, должны обеспечивать большую жесткость испытания устройства.

Чтобы обеспечить надежность результатов определения энергии зажигания, требуется предварительно хорошо смешать компоненты и обеспечить строго определенный компонентный состав газо- или пылевоздушной смеси в разрядном искровом промежутке. Разрядный искровой промежуток должен превышать критическое значение, при котором электроды способны оказывать охлаждающее влияние на образующееся ядро пламени. Разрядная цепь и ее компоненты должны обеспечивать емкостной характер разряда. Оптимизация тока и постоянной времени разрядной цепи для разрядов, зажигающих пылевоздушные смеси, должны выполняться с учетом опыта.

Когда применяется датчик воспламенения, необходима хорошая общая вентиляция, чтобы избежать скопления большого объема взрывоопасной смеси и в случае зажигания — риска крупномасштабного взрыва.

8.11.2 Эквивалентная энергия

Зажигаемость горючих веществ и материалов от разрядов статического электричества характеризуют минимальной энергией зажигания. Плотность мощности разряда статического электричества также важна для характеристики вероятности зажигания разрядом статического электричества. При этом, за исключением вышерассмотренного случая получения искровых разрядов, в основном, определить полную энергию разряда статического электричества нелегко. Намного легче определить, сколько энергии затрачивается на зажигание. По этой причине искровой разряд используется, чтобы измерить энергию зажигания, так как такой разряд обеспечивает высокую плотность энергии во времени и в пространстве и позволяет определить затраченную энергию. При других неискровых разрядах статического электричества эквивалентная энергия определяется как X джоулей, когда разряд зажигает смесь с минимальной энергией зажигания X джоулей. Так эквивалентная энергия экспериментально определена по энергии зажигания. Это удобно при анализе риска зажигания. Будем считать, что энергия разряда (неискрового) соответствует этой эквивалентной энергии. Так называемая эффективная энергия определяемого электростатического разряда определяется по факту зажигания смеси с известной минимальной энергией зажигания и принимается равной минимальной энергии зажигания этой смеси (см. [7] и [8]).

8.12 Перенос заряда при ЭСР

8.12.1 Общие положения

ВНИМАНИЕ — Не проводить измерения переноса заряда в импульсах разрядов во взрывоопасной среде.

При любых разрядах статического электричества можно проводить измерения зарядов в единичных импульсах тока. Проведение таких измерений позволяет определять зажигающую способность разрядов статического электричества. В [7] показано, что вероятность зажигания горючей среды разрядом статического электричества может быть связана с зарядом в импульсе разрядного тока. Следует отметить, что соотношение между зарядом в импульсе и вероятностью зажигания может быть ограничено спецификой материалов, с которых возникают разряды, и применяемой методикой измерений. Причина этого состоит в том, что разряды отличаются по пространственному и временному распределению энергии. Например, при одинаковом заряде в импульсе меньшая вероятность зажигания возможна при кистевом разряде, чем при искровом. Это возможно, потому что энергия при кистевом разряде распределена в значительно большем объеме газа. Хотя минимальные значения зарядов зажигания установлены для различных газов, их следует применять только как справочные значения. Этими значениями следует пользоваться при проведении измерений зарядов в импульсах в целях обеспечения безопасности самих измерений.

Базовая схема для измерения заряда в импульсе при электростатическом разряде показана на рисунке 6.

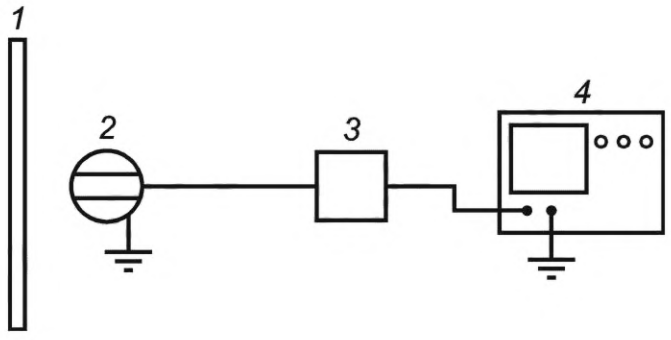


Рисунок 6а) — Основное расположение устройств

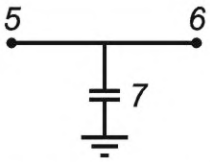


Рисунок 6b) — Измерительная цепочка с конденсатором

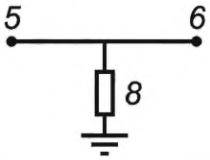


Рисунок 6c) — Измерительная цепочка с резистором

1 — заряженный объект или поверхность; *2* — сферический двухкомпонентный разрядный электрод; *3* — измерительная цепь; *4* — цифровой запоминающий осциллограф (например, с полосой пропускания 1 ГГц); *5* — контактное соединение с электродом; *6* — контактное соединение с осциллографом; *7* — конденсатор (например, 20 нФ); *8* — резистор (например, 0,25 Ом)

Рисунок 6 — Базовая схема измерения заряда в импульсах разрядов статического электричества с альтернативными измерительными цепями

8.12.2 Электрод-разрядник

Размер и форма электрода должны обеспечивать возможность проведения измерений, для которых он предназначен. Например, оптимальный диаметр для получения разрядов с сильно заряженных поверхностей составляет приблизительно 30 мм. Сферический электрод диаметром (25 ± 5) мм для измерения количества заряда, переданного в результате электростатического разряда, описан в IEC 60079-32-2 и ISO 80079-36. Для поверхностей с более низкой поверхностной плотностью зарядов более подходящим может оказаться электрод меньшего диаметра, например электрод с диаметром 2 мм, особенно если исследуется зажигание смесей с высокой чувствительностью к зажигающему воздействию разрядов, например водородовоздушные смеси. Применение электродов с диаметром существенно меньше 2 мм следует исключить, т. к. они способны к коронированию. Электроды диаметром более 10 мм должны быть двухкомпонентными, с центральной частью, соединенной с измерительной системой и с внешним заземленным экраном. Применение двухкомпонентных электродов необходимо, чтобы избежать эффекта заряжения по индукции еще до того, как произойдет разряд.

8.12.3 Схема измерений

Измерительная цепочка может быть устроена по одному из двух вариантов: может быть применен конденсатор или резистор, обычно в 20 нФ и 0,25 Ом соответственно. Осциллограф отражает изменение напряжения во времени. Для каждого варианта измерительной цепочки, как показано на рисунке 7, получается своя осциллограмма изменения напряжения во времени.

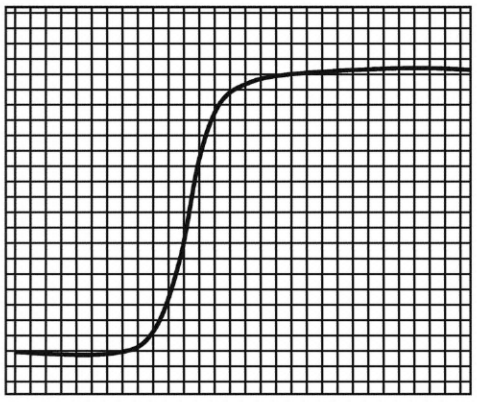


Рисунок 7a) – Емкостная измерительная цепочка

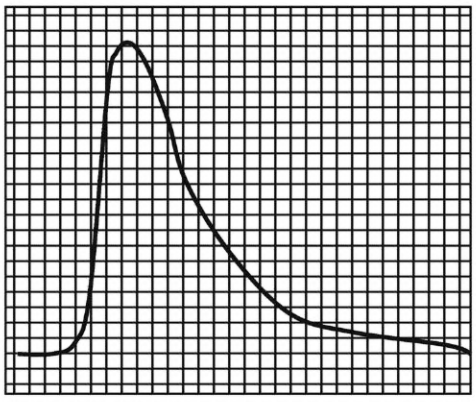


Рисунок 7b) – Резисторная измерительная цепочка

Примечание — Это идеализированные осциллограммы, на практике график соотношения напряжение/время может иметь форму колокола и другие.

Рисунок 7 — Осциллограмма напряжение/время

Применение конденсатора в измерительной цепочке обеспечивает получение ступенчатой осциллограммы. Заряд в импульсе в кулонах рассчитывается умножением амплитуды в вольтах на величину емкости конденсатора в фарадах.

Резистор в измерительной цепи вырабатывает импульс. Измерительная система осциллографа интегрирует напряжение по времени для получения значения в вольтах на секунду (В · с), которое можно разделить на значение сопротивления в омах, чтобы получить перенос заряда в кулонах.

8.12.4 Альтернативные устройства измерения заряда в импульсах

Для применения доступны коммерческие приборы, переносные кулонометры, предназначенные для измерения заряда в импульсе при электростатических разрядах. Приборы просты в обращении и обеспечивают прямое считывание данных измерения. Они полезны для выявления разрядов, представляющих опасность как потенциальные источники зажигания. Но при их использовании необходимо учитывать следующее:

a) если разрядный электрод входит в комплект прибора, то его геометрические параметры (диаметр) могут оказаться неоптимальными для проводимых измерений;

b) если разрядный электрод — твердая сфера, данные измерений могут искажаться индуцированными зарядами;

c) если прибор не предназначен для проведения импульсных измерений, то невозможно установить, является ли измеренное значение характеристикой одиночного разрядного импульса или интегральной характеристикой серии разрядных импульсов.

8.13 Емкость

Емкость может быть измерена путем применения моста переменного напряжения или путем изменения напряжения при разделении заряда между известной и неизвестной емкостью. Для заряда, разделенного между емкостями C_1 и C_2 с начальными напряжениями V_1 и V_2 и конечным напряжением V_3, неизвестную емкость C_2 вычисляют по формуле

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_2}. \quad (10)$$

При измерениях значений емкости конденсаторов, предназначенных для получения искровых разрядов с определенной энергией, необходимо учитывать возможные потери в диэлектриках, в связи с чем эффективная емкость может оказаться меньше измеренной низкочастотными методами. Поэтому предпочтительно проводить измерения емкости в пределах нормальных операционных значений напряжения по методу распределения известного заряда с применением высококачественного конденсатора известной емкости.

При измерениях малых значений емкости следует исключить емкость применяемых соединений и не вносить в них изменений в процессе измерений.

8.14 Электрическая прочность

Измерение электрической прочности тонких пленок или слоев изоляции — важный фактор при оценке возможности возникновения скользящих поверхностных кистевых разрядов на материале. Важный параметр — напряжение пробоя, критическое значение которого равно приблизительно 4 кВ.

Электрическая прочность изоляторов зависит от дефектов материала. Поэтому результат существенно зависит от площади поверхности испытуемого образца. Число дефектов возрастает и, следовательно, электрическая прочность уменьшается по мере увеличения площади поверхности испытуемого образца. И наоборот, при меньшей площади получают большее напряжение пробоя, а значит, и заключение о большей опасности применения материала. Например, электрическая прочность полиэтилена приблизительно 20 МВм$^{-1}$. Таким образом, напряжение до 4 кВ выдержит слой с толщиной приблизительно 200 мкм. Емкость конденсатора пластины с таким слоем диэлектрика равна приблизительно 90 нФ · м$^{-2}$, и запасенная энергия (0,5 CV^2) при 4 кВ составляет 720 мДж · м$^{-2}$. Для площади образца 100 см^2 это приблизительно 7 мДж. Поэтому электроды площадью в несколько квадратных сантиметров обеспечат реальную оценку опасности.

Для обеспечения напряжения пробоя применяют простую электрическую цепь заряжения конденсатора. При испытании важно исключить удар током. Такая опасность сопряжена с применением высокого напряжения, больших емкостей и относительно низких защитных сопротивлений. Методы испытаний приведены в IEC 60243-1 и IEC 60243-2.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта
IEC 60079-10-1	IDT	ГОСТ IEC 60079-10-1—2013 «Взрывоопасные среды. Часть 10-1. Классификация зон. Взрывоопасные газовые среды»
IEC 60079-10-2	IDT	ГОСТ IEC 60079-10-2—2011 «Взрывоопасные среды. Часть 10-2. Классификация зон. Взрывоопасные пылевые среды»
IEC TS 60079-32-1:2013	IDT	ГОСТ 31610.32-1—2015/IEC/TS 60079-32-1:2013 «Взрывоопасные среды. Часть 32-1. Электростатика. Опасные проявления. Руководство»
IEC 60079-32-2	IDT	ГОСТ 31610.32-2—2016/IEC 60079-32-2:2015 «Взрывоопасные среды. Часть 32-2. Электростатика. Опасные проявления. Методы испытаний»
IEC 61000-4-2	MOD	ГОСТ 30804.4.2—2013 (IEC 61000-4-2:2008) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний»
IEC 61340-5-1	IDT	ГОСТ IEC 61340-5-1—2019 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования»
IEC TR 61340-5-2	IDT	ГОСТ IEC TR 61340-5-2—2021 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Руководство по применению»
IEC 61340-6-1	—	*
IEC 60243-1	—	*
IEC 60243-2	—	*
ISO/IEC 80079-20-2	IDT	ГОСТ 31610.20-2—2017/ISO/IEC 80079-20-2:2016 «Взрывоопасные среды. Часть 20-2. Характеристики материалов. Методы испытаний горючей пыли»
ISO 80079-36:2016	MOD	ГОСТ 32407—2013 (ISO/DIS 80079-36) «Взрывоопасные среды. Часть 36. Неэлектрическое оборудование для взрывоопасных сред. Общие требования и методы испытаний»

* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты.

Библиография

[1] LUTTGENS G. and WILSON N. Electrostatic Hazards, Butterworth, Heinemann, 1997 (ЛАТТГЕНС Г. и УИЛСОН Н. Электростатические опасности, Баттерворт, Хайнеманн, 1997)

[2] AMERASEKARA A. and DUVVERY C. ESD in Silicon Integrated Circuits, John Wiley & Sons Ltd, 1995 (АМЕРАСЕКАРА А. И ДЮВЕРИ С. ЭСР в Кремниевых интегральных схемах, John Willey & Sons Ltd, 1995)

[3] KELLY M. A Comparison of electrostatic discharge models and failure signatures for CMOS integrated circuit devices, EOS/ESD Symposium, 1995 (КЕЛЛИ М. Сравнение моделей электростатического разряда и признаков отказа для устройств с интегральной схемой CMOS, Симпозиум EOS /ESD, 1995)

[5] CROSS J.A. Electrostatics — Principles, Problems and Applications, Adam Hilger, Bristol, 1987 (КРОСС Дж.А. Электростатика — принципы, проблемы и применения, Адам Хилгер, Бристоль, 1987)

[6] CHANG Jen-Shih et al. Handbook of Electrostatic Processes, Marcel Dekker New-York — Basel — Hong Kong, 1995 (ЧАНГ Джен-Шин и др. Справочник по электростатическим процессам, Марсель Деккер, Нью-Йорк — Базель — Гонконг, 1995)

[7] GIBSON N. And LLOYD F.C. Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics, Brit. J. Appl. Phys., Vol. 16, pp. 1619—1631, 1965 (ГИБСОН Н. и ЛЛОЙД Ф.С. Зажигательность разрядов из электростатически заряженных пластмасс, Брит. Дж. Приложение. Физика, Том 16, стр. 1619—1631, 1965)

[8] BRITTON L.G. Avoiding static ignition hazards in chemical operations. American Institute of Chemical Engineers, New-York, 1999 (БРИТТОН Л.Г. Предотвращение опасности статического воспламенения при химических операциях. Американский институт инженеров-химиков, Нью-Йорк, 1999)

[9] IEC 60068-1:2013 Environmental testing — Part 1: General and guidance (Испытание на воздействие внешних факторов. Часть 1. Общие положения и руководство)

[10] ISO/IEC 80079-20-1 Explosive atmospheres — Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification — Test methods and data (Взрывоопасные среды. Часть 20-1. Характеристики веществ для классификации газа и пара. Методы испытаний и данные)[1)]

[12] IEC 60079-17 Explosive atmospheres — Part 17: Electrical installations inspection and maintenance (Взрывоопасные среды. Часть 17. Проверка и техническое обслуживание электроустановок)

[14] IEC 60721-2-1 Classification of environmental conditions — Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature — Temperature and humidity (Классификация внешних воздействующих факторов. Часть 2-1. Природные внешние воздействующие факторы. Температура и влажность)

[15] IEC 61340-2-1 Electrostatics — Part 2-1: Measurement methods — Ability of materials and products to dissipate static electric charge (Электростатика. Часть 2-1. Методы испытаний. Способность материалов и изделий рассеивать электростатические заряды)

[16] IEC 61340-2-3 Electrostatics — Part 2-3: Methods of test for determining the resistance and resistivity of solid planar materials used to avoid electrostatic charge accumulation (Электростатика. Часть 2-3. Методы определения сопротивления и удельного сопротивления твердых материалов, используемых для предотвращения накопления электростатического заряда)

[17] IEC 60749-26 Semiconductor devices — Mechanical and climatic test methods — Part 26: Electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing — Human body model (HBM) [Приборы полупроводниковые. Методы механических и климатических испытаний. Часть 26. Испытание чувствительности к электростатическому разряду (ЭСР). Модель человеческого тела (МЧТ)]

[18] IEC 60749-27 Semiconductor devices — Mechanical and climatic test methods — Part 27: Electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing — Machine model (MM) [IEC 60749-27. Приборы полупроводниковые. Методы механических и климатических испытаний. Часть 27. Испытание чувствительности к электростатическому разряду (ЭСР). Механическая модель (ММ)]

[19] IEC 61340-4-1 Electrostatics — Part 4-1: Standard test methods for specific applications — Electrical resistance of floor coverings and installed floors (Электростатика. Часть 4-1. Методы испытаний для прикладных задач. Электрическое сопротивление напольных покрытий и установленных полов)

[1)] *В ЕАЭС действует ГОСТ 31610.20.1—2020 (ISO/IEC 80079-20-1:2017).*

[20] IEC 61340-4-4 Electrostatics — Part 4-4: Standard test methods for specific applications — Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC) [Электростатика. Часть 4-4. Методы испытаний для прикладных задач. Мягкие контейнеры для сыпучих материалов (МКСМ). Классификация по электростатическим свойствам]

[21] IEC 61892-7 Mobile and fixed offshore units -— Electrical installations — Part 7: Hazardous areas (Основания морские передвижные и стационарные. Электрические установки. Часть 7. Взрывоопасные зоны)

[22] VON PIDOLL U. et al. Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures. IEEE Trensactions on Industry Applications, 40 (2004), 1467-1475 [ФОН ПИДОЛЛ У. и др. Определение воспламеняемости электростатических разрядов без взрывоопасных газовых смесей. Транзакции IEEE по отраслевым применениям, 40 (2004), 1467-1475]

[23] LANEGER T. et al. PTB, Braunschweig, 2010 (ЛАНГЕР Т. и др., ПТБ, Брауншвейг, 2010)

[24] GLOR M. Et al. Measurement of Charge Transfer during Filling and Emptying FIBC; Process Safety and Enviromental Protection 87 (1), pp. 64—69 (ГЛОР М. и др. Измерение переноса заряда во время заполнения и опорожнения МКСМ; Безопасность процесса и защита окружающей среды 87 (1), стр. 64—69)

[25] TAYLOR D.M., SECKER P.E. Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements, 1994 (ТЕЙЛОР Д.М., СЕКЕР П.Э. Промышленная электростатика: основы и измерения, 1994)

[26] IEC 60749-28 Semiconductor devices — Mechanical and climatic test methods — Part 28: Electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing — Charged device model (CDM) — device level [Приборы полупроводниковые. Методы механических и климатических испытаний. Часть 28. Испытание на чувствительность к электростатическим разрядам. Модель заряженного устройства (МЗУ). Уровень устройства]

УДК 621.3.083:006.354 МКС 29.020
17.220.99 IDT

Ключевые слова: электростатика, упаковка, защита от электростатического разряда, методы испытаний

Редактор *М.В. Митрофанова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Д. Дульнева*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 05.05.2023. Подписано в печать 17.05.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,10.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru