

# Вопросы безопасности при использовании оптронов и альтернативных изоляторов для защиты от поражения электрическим током

**Оптроны, так же, как и другие типы изоляторов, находят широкое применение в решениях, где требуется организация развязки управляющих сигналов и сигналов с высоким уровнем напряжения. Оптроны используются в высоковольтном оборудовании для обеспечения безопасности оператора. Применение оптронов или альтернативных изоляторов для обеспечения безопасности требует соответствия их характеристик существующим стандартам и понимания этих стандартов разработчиком.**

**Александр Зейников**

[alexander.zeynikov@broadcom.com](mailto:alexander.zeynikov@broadcom.com)

## **Основы электробезопасности**

Электрический удар, вызванный прохождением электрического тока через тело человека, может привести к негативным физиологическим последствиям, начиная от непроизвольного сокращения сердечной мышцы и заканчивая фибрилляцией желудочков и летальным исходом. Значение порога напряжения, при котором могут возникнуть негативные последствия для человека, является не постоянным и может изменяться в зависимости от влажности и сопротивления поверхности кожи, а также от других факторов. Общепринятым значением порога безопасного напряжения считается 42 В АС и 60 В DC. Любые системы, в которых оператор может быть подвержен напряжению, значение которого превышает установленный порог, считаются потенциально опасными и требуют наличия электрической изоляции.

## **Коэффициент безопасности**

Когда при разработке решения, помимо прочего, необходимо обеспечить безопасность оператора, проектировщики вынуждены учитывать так называемые коэффициенты безопасности. Данные коэффициенты служат для учета условий, которые не являются определенными (детерминированными) в полной мере и способны вызвать отказ оборудования или другие негативные последствия лишь в отдаленной перспективе. Коэффициенты безопасности являются неотъемлемой частью большинства инженерных дисциплин.

В качестве примера, в гражданском строительстве общий коэффициент безопасности, используемый для расчета опорных элементов при возведении зданий, обычно равен 2. Более высокое значение коэффициента следует применять в тех случаях, когда неизвестно качество какого-либо из используемых материалов.

Для аэрокосмической отрасли обычно используется коэффициент безопасности, равный 1,25. Более низкое значение коэффициента в данном случае оправдано строгим контролем качества и веса оборудования, а также частыми проверками на соответствие и обслуживание. Для электротехнических решений, в которых требуется наличие усиленной изоляции, значение коэффициента безопасности принято считать 2.

## **Воздействие рабочего напряжения**

При нормальной работе устройства оптрон или изолятор другого типа подвержен воздействию постоянного напряжения определенной величины. Такое напряжение обычно называют рабочим.

Поскольку воздействие напряжения на изолятор в данном случае носит непрерывный характер, пробой изоляции значительно повышает риск поражения оператора. По этой причине значение допустимого рабочего напряжения изолятора, как правило, устанавливается в 2 раза выше номинального напряжения системы.

### Воздействие переходного напряжения

Помимо способности выдерживать постоянное рабочее напряжение, оптрон или изолятор, выполненный по другой технологии, должны выдерживать скачки напряжения во время переходных процессов, условно подразделяющихся на процессы с высоким значением энергии и низким (табл.).

Переходные процессы с высоким значением энергии могут представлять опасность для оператора. В то же время переходные процессы с низким значением, хотя и не представляют непосредственной угрозы для оператора, могут нанести вред изоляционному материалу, что в итоге также может нарушить общую безопасность системы.

### Переходные процессы с низким значением энергии

Один из наиболее распространенных переходных процессов, порождающих скачок напряжения, — электростатический разряд (ЭСР, ESD). Значение напряжения при воздействии ESD в системе может превышать 15 кВ, что, в свою очередь, способно спровоцировать пробой изолятора. К счастью, электростатический разряд редко представляет прямую угрозу безопасности оператора.

Что же касается воздействия на изолятор, то пробой изоляционного барьера является своего рода самоограничивающимся событием, сводящим к минимуму максимальное напряжение на выходе изолятора. Однако, несмотря на это, нагрузка на изолятор, вызванная переходным напряжением, которое еще не достигло значения напряжения пробоя, может быть чрезвычайно высокой. Значение величины ESD зависит от многих внешних факторов, таких как высота над уровнем моря, влажность, и других.

Даже относительно низкий уровень ESD может привести к мгновенному или растянутому во времени повреждению изоляции. Как следствие, это может повлечь негативные последствия, связанные с безопасностью оператора (в случае если рабочее напряжение системы выходит за пределы порога безопасности).

При использовании оптических изоляторов подобный сценарий можно предотвратить путем масштабирования толщины изоляции. В частности, увеличение толщины изоляционного материала позволяет гарантировать, что напряжение пробоя внутреннего слоя изоляции будет выше, чем внешнего. Однако подобную защиту куда сложнее организовать при использовании альтернативных типов изоляторов, где сам принцип работы построен на применении достаточно тонких изоляционных слоев.

Такие типы устройств уязвимы для ESD. С точки зрения используемого изоляционного материала их можно разделить на две группы: изоляторы с полиимидной пленкой в виде спирали (spin on polyimide coatings) и изоляторы с использованием диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>).

Устройства с SiO<sub>2</sub> в качестве изоляционного материала особенно сильно подвержены воздействию ESD, и разработчикам микросхем приходится применять дополнительные методы защиты, чтобы избежать пробоя изолятора.

Как правило, для этого применяются специальные ограничители напряжения. Однако подключение ограничителя напряжения напрямую к изолятору не очень практичное решение, так как только увеличивает риск поражения ESD.

### Переходные процессы с высоким значением энергии

События, при которых происходит выброс высокого напряжения во время переходного процесса, обычно распространены в системах распределения энергии. Выброс напряжения в данном случае может быть вызван включением тяжелой техники или в редких случаях — ударом молнии.

Так как подобные выбросы представляют непосредственную опасность для жизни и здоровья оператора, необходимо, чтобы толщина изоляционного материала в используемых изоляторах точно соответствовала требованиям, а сам изолятор обеспечивал должный уровень защиты. Толщина изолятора регулируется специальным стандартом для оборудования, называемым «категория перенапряжений», и зависит от класса перенапряжения. Таким образом, для каждого отдельного случая применения можно подобрать соответствующий класс требований к толщине уровня изоляции и обеспечить должный уровень безопасности.

### Тестирование компонентов на воздействие высокого напряжения

Пригодность оптического изолятора или изолятора другого типа, помимо соответствия необходимым стандартам безопасности, также зависит от результатов проведения электрических испытаний.

#### Испытание диэлектрика

Цель данного испытания — установить способность изолятора выдерживать высокое напряжение в течение короткого периода времени, обычно составляющего около 1 мин.

Примером стандарта, регулирующего проведение подобных испытаний, является UL1577. Критерием прохождения испытаний служит значение тока утечки. Данный стан-

дарт также позволяет определить способность изолятора выдерживать нагрузки в реальных условиях эксплуатации.

К сожалению, UL1577 имеет весьма ограниченный диапазон применений, в частности, он не устанавливает безопасного значения постоянного напряжения изолятора.

#### Тестирование на частичный разряд

Тестирование на частичный разряд позволяет определить способность изолятора не только выдерживать высокое значение напряжения во время переходных процессов, но и сохранять целостность изоляционного материала при номинальном рабочем напряжении. Суть тестирования заключается в проверке на наличие в изоляционном материале микрополостей, которые впоследствии могут спровоцировать эрозию изоляционного материала из-за накапливаемого заряда и последующей разрядки, что в конечном итоге грозит выходом изолятора из строя.

Проведение тестирования на частичный разряд при значениях напряжения, близких к номинальному, позволяет выявить нарушение целостности изоляционного материала, определить механизм старения изолятора и установить точное значение напряжения, при котором изолятор будет соответствовать необходимым параметрам безопасности в условиях реального применения.

Еще одно преимущество данного метода тестирования — возможность проведения испытаний с напряжением, максимально приближенным к реальным условиям эксплуатации. Конечная цель выполнения теста на частичный разряд — это определение наличия или отсутствия полостей в изоляционном материале компонента.

Стоит отметить, что ни один изоляционный материал не может обеспечить 100%-ное отсутствие микрополостей, поэтому данное тестирование не может выдать абсолютного значения: есть полости или нет. Типичная установка для проведения испытаний фиксирует значение разряда величиной от 1 пКл. В условиях реального применения безопасным считается значение частичного разряда на уровне 5 пКл.

Одним из первых стандартов, определивших методику и требования к тестированию на частичный разряд для оптических изоляторов, стал VDE0884, впоследствии преобразованный в международный стандарт IEC60747-5-5.

Изоляционный барьер оптических изоляторов представляет собой гибридную

Таблица. Номинальные значения напряжений в импульсных системах согласно IEC60664-1

Номинальное напряжение системы, В		Фазное напряжение DC или AC, В	Номинальное импульсное напряжение, В			
3 фазы	1 фаза		Категория перенапряжения			
			1	2	3	4
		50	330	500	800	1500
		100	500	800	1500	2500
	120-240	150	800	1500	2500	4000
230/400 277/480		300	1500	2500	4000	6000
400/690		600	2500	4000	6000	8000
1000		1000	2500	4000	6000	8000

конструкцию, состоящую из прозрачного изолятора (полиимидной пленки) и окружающего его непрозрачного материала (эпоксидной смолы).

Возникает вопрос, какой именно материал подвергается тестированию при проведении теста на частичный разряд согласно IEC60747-5-5? В общем случае ответом является тестирование обоих составляющих материалов.

При проведении тестирования на частичный разряд для определения наличия пустот в изоляционном материале необходимо принимать во внимание общее значение накопленного заряда в диэлектрике. В случае если электрическое поле является однородным, то накопленный заряд равномерно распределяется по всему изоляционному материалу, поэтому измерение частичного разряда применимо для всей конструкции изолятора. Общая емкость для типичного оптического изолятора составляет примерно 0,7 пФ. В реальных условиях однородность электрического поля может иметь некоторый дисбаланс, однако данным явлением можно пренебречь и считать тестирование на частичный разряд приемлемым методом для определения целостности как внешнего слоя изоляционного барьера, так и внутреннего изоляционного материала.

В некоторых случаях тестирование на частичный разряд также применимо к изоляторам, выполненным по другим технологиям (емкостный и индуктивный изоляторы). Однако в этом случае достоверность результатов тестирования будет значительно уступать оптическим изоляторам из-за куда менее однородного распределения электрического поля.

К примеру, типичный изолятор, выполненный по альтернативной технологии, может иметь значение емкости около 100 мкФ, что при проведении тестирования на частичный разряд с прикладываемым напряжением 1000 В выдаст 100 пКл накопленного заряда.

В данном контексте значение 5 пКл, которое является пределом и критерием прохождения теста для оптических изоляторов, имеет мало общего с реальными значениями для изо-

ляторов, выполненных по альтернативным технологиям. Если бы в данных изоляторах значение накопленного заряда действительно составляло 5 пКл, то, скорее всего, такой изолятор был бы подвержен лавинному пробую еще на этапе тестирования.

В то время как тестирование на частичный разряд является приемлемым методом для определения пустот во внешнем изоляционном материале для всех типов изоляторов, данная методика совершенно не подходит для тестирования основного изоляционного слоя емкостных и индуктивных изоляторов.

### Требования к конструкции оптического изолятора с точки зрения электробезопасности

Говоря о конструктивных требованиях безопасности, следует учитывать два основных аспекта: внутренняя структура изолятора и внешние параметры компонента.

#### Внутренняя структура изолятора

Прежде чем принять решение о структурных и конструктивных требованиях, необходимо определить область использования, а также необходимый уровень изоляции (базовая или усиленная):

- Базовая изоляция подразумевает обеспечение работы и функционала устройства при нормальных условиях. Данная изоляция не обеспечивает должного уровня защиты от поражения электрическим током.

- Усиленная изоляция используется в тех случаях, когда в устройстве требуется наличие защиты от поражения электрическим током. Термин «усиленная» также иногда заменяется термином «двойная» изоляция.

Двойная изоляция буквально означает способность поддерживать безопасную работу устройства при увеличении прикладываемого напряжения в два раза от номинального значения. Физический способ достижения данного уровня изоляции также может носить буквальный характер: использование двух отдельных слоев изоляции, каждый из которых

способен удерживать уровень номинального напряжения. Тем не менее в некоторых случаях усиленная изоляция достигается и при использовании только одного слоя изоляции (зависит от используемого материала).

Требования к изоляционным барьерам могут варьироваться в зависимости от нормативных стандартов. К примеру, если в качестве стандарта конечного оборудования используется IEC60950, то для обеспечения двойной, или усиленной, изоляции считается достаточной толщина изоляционного барьера 0,4 мм и более. Помимо толщины барьера, также важно качество и структура материала, например, толстая полиимидная пленка может считаться твердым изоляционным материалом, а отдельные слои полиимида в виде покрытия наподобие эмали — уже нет.

### Внешние параметры компонента

Требования к внешним параметрам компонента также важны для обеспечения безопасности. Двумя ключевыми критериями оценки в этом отношении являются диэлектрический зазор (clearance) и минимальный путь утечки по поверхности изолятора (creepage distances) (рис. 1).

#### Clearance

Clearance — это диэлектрический зазор, кратчайшее расстояние между входными и выходными клеммами микросхемы. Значение данного параметра должно быть достаточным, чтобы на контактах микросхемы не возникало электрического пробоя.

Величина напряжения пробоя зависит от внешних факторов, таких как высота над уровнем моря и влажность. Вероятность пробоя возрастает при использовании компонента на большой высоте с низким значением влажности воздуха.

Требования к физическим параметрам микросхемы для предотвращения пробоя определены в специальных стандартах, например IEC60664. В данном стандарте приведены рекомендуемые параметры компонента для предотвращения возникновения пробоя при различных условиях эксплуатации. Эти значения основаны на эмпирических измерениях и феноменологическом понимании процесса пробоя изолятора. Для соответствия требованиям усиленной изоляции величина расстояния между контактами умножается на коэффициент безопасности, по умолчанию равный 2.

Помимо конструкции самой микросхемы, также необходимо учитывать расстояние между контактами после установки на печатной плате в конечном устройстве и соблюдать осторожность, чтобы не изменить геометрию расстояния до критического значения во время пайки или сборки.

#### Путь утечки (creepage distances)

Другим важным внешним параметром является путь утечки по поверхности изолятора — кратчайшее расстояние между контактами по корпусу компонента. Причина,

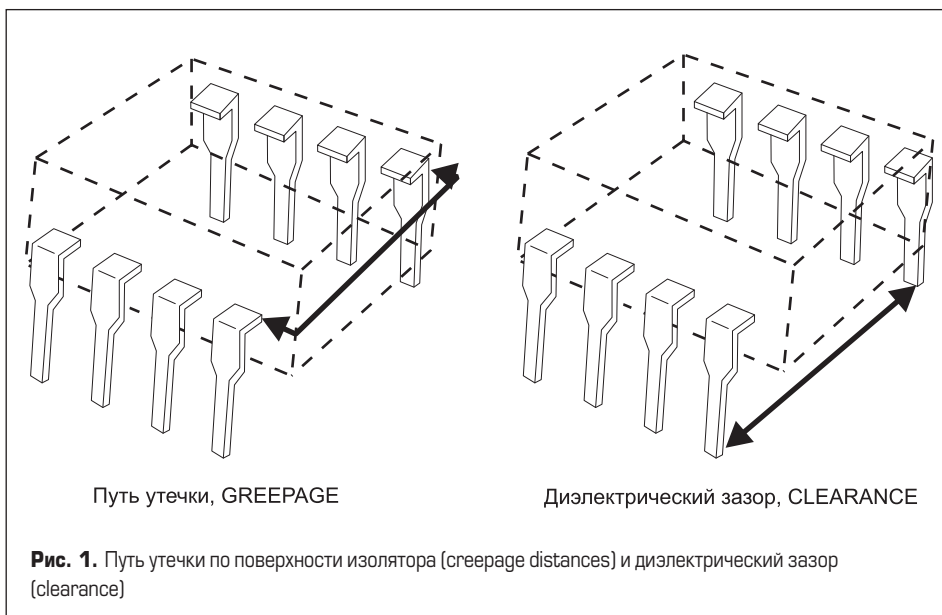


Рис. 1. Путь утечки по поверхности изолятора (creepage distances) и диэлектрический зазор (clearance)

по которой данный параметр считается важным, заключается в том, что в некоторых случаях проводящая дорожка может начать формироваться на поверхности изолятора. К факторам, способным повлиять на данный процесс, относятся внешнее загрязнение (пыль или влага), а также категория и склонность материала корпуса к подобным видам загрязнения. Требования к пути утечки по поверхности изолятора описаны в стандарте IEC60664.

### Срок службы изолятора

Поскольку подавляющее большинство сфер применения изоляторов не подразумевает регулярной проверки целостности изоляционных барьеров данных компонентов, крайне важно, чтобы их характеристики соответствовали нормам безопасности на протяжении всего срока службы без необходимости какого-либо вмешательства со стороны пользователя.

### Определение времени жизни компонента

Определение того, что считается безопасным временем жизни для компонента, является несколько субъективным и зависит от конкретного производителя. Например, производитель емкостных или индуктивных изоляторов может рассматривать конечное значение безопасного срока жизни компонента как время, когда 1% устройств из партии выходит из строя при номинальном значении рабочего напряжения. Проблема с такой установкой конечного значения срока жизни заключается в том, что выход из строя даже 1% компонентов может нести угрозу жизни и здоровью оператора в критических условиях. Также при таком подходе не учитывается влияние скачков напряжения при переходных процессах и других факторов безопасности.

Более традиционным способом является рассмотрение конца времени безопасной работы как момента, когда возникает статистически незначимая вероятность возникновения одного из двух следующих сценариев:

1. Изоляция компонента ухудшилась до такой степени, что скачок напряжения при переходном процессе, значение которого соответствует характеристикам компонента, может привести к необратимому разрушению изоляционного барьера.
2. Изоляция компонента ухудшилась до такой степени, что изоляционный барьер не способен выдержать прикладываемое напряжение, в 2 раза превышающее номинальное рабочее значение.

В связи с тем, что существует два возможных сценария отказа компонента, необходимо рассмотреть их по отдельности, особенно с учетом того факта, что на практике данные сценарии не являются взаимоисключающими.

### Износ, вызванный воздействием скачков напряжения при переходных процессах

Допустимые значения скачков напряжения при переходных процессах описаны в стандар-

те UL1577, а также в IEC60747-5-5. Однако оба стандарта не предоставляют данных о допустимых значениях перенапряжения на протяжении всего срока службы, а приводят сведения только для коротких периодов времени.

Вероятность возникновения перенапряжения, вызывающего повреждение изоляции из-за коронной эрозии и других механизмов разрушения, достаточно высока. Как следствие, накопление подобных повреждений в течение всего срока службы изолятора является важной проблемой, даже в тех случаях, когда воздействие перенапряжения носило краткосрочный характер. Легко заметить, что суммарное время воздействия всех переходных процессов, даже при умеренном сроке службы оборудования, может легко превысить номинальное время тестирования.

Для устранения подобного недостатка и более точного прогноза времени безопасной работы изолятора необходимо масштабировать толщину изоляционного барьера при проведении испытаний на перенапряжение согласно UL1577.

Особо следует отметить значительную разницу в результатах испытаний на воздействие перенапряжения для оптических изоляторов и изоляторов, изготовленных на базе других технологий. Скажем, там, где оптический изолятор способен выдерживать перенапряжение на протяжении сотен часов, емкостной или индуктивный изолятор может выдержать менее 15 мин. Такая разница при тестировании неизбежно влечет за собой расхождения в сроке службы при реальных условиях эксплуатации в конечном устройстве.

### Износ, вызванный непрерывным воздействием рабочего напряжения

Второй сценарий износа подразумевает выход из строя компонента из-за постоянного воздействия рабочего напряжения номинального значения.

Основная проблема тестирования на вероятность возникновения данного сценария состоит в том, чтобы не допустить влияния факторов, вызывающих активный износ компо-

нентов, а также определение того, что эрозия изоляции происходит не из-за частичных разрядов во внутренней структуре изоляционного материала. Кроме того, существуют и другие механизмы старения, которые необходимо учитывать при проведении тестирования. Для полимерных изоляционных материалов одним из таких механизмов является деградация пространственного заряда (рис. 2).

Пространственный заряд — это название, которое дается заряду, генерируемому в изоляционном материале под воздействием высокого напряжения. Пространственный заряд способен изменять электрическое поле и провоцировать возникновение высокого напряжения на определенных участках изолятора. Уровень пространственного заряда определяется как соотношение приложенного напряжения к толщине материала изолятора (кВ/мм). Другими факторами, влияющими на величину заряда, являются рабочая температура, тип и частота сигнала.

Деградация пространственного заряда в полимерных материалах сегодня стала областью активных исследований, хотя полного понимания процесса пока что достичь не удалось. Существуют некоторые четкие и постоянно фиксируемые признаки деградации пространственного заряда, которые допустимо применить при прогнозировании срока службы. При рассмотрении графика времени жизни изолятора видно, что он принимает форму асимптоты и при снижении уровня заряда в изоляторе увеличивается время его жизни.

Срок службы изолятора увеличивается при снижении прикладываемого напряжения ниже начального уровня, что также снижает эффект деградации пространственного заряда до минимальной величины.

Так как в оптических изоляторах используются довольно толстые изоляционные материалы с низким значением кВ/мм, деградация пространственного заряда не является для них существенной проблемой.

Однако для изоляторов, изготовленных по альтернативным технологиям, деградация

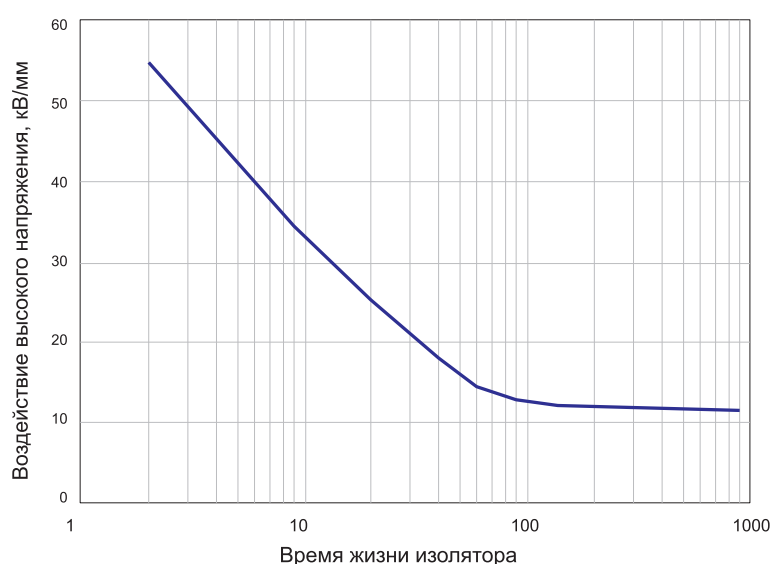


Рис. 2. Время жизни изолятора при деградации пространственного заряда



пространственного заряда может носить ощутимый характер, ввиду использования в них довольно тонких изоляционных материалов. В этом случае изначально высокое значение кВ/мм приводит к деградации пространственного заряда. Данный эффект можно наблюдать при проведении тестирования на длительность срока службы при воздействии высокого напряжения. Еще более тревожным является тот факт, что длительные испытания при воздействии напряжения, сравнимого по значению с номинальным рабочим, показывают, что отказы присутствуют даже в рамках тех временных периодов, которые обычно считаются безопасными для оборудования, используемого конечным пользователем.

### Заключение

Уже несколько десятилетий оптические изоляторы находят широкое применение в различных приложениях, связанных с электробезопасностью. Однако, несмотря на это, стоит отметить, что в некоторых случаях стандарты безопасности, связанные с оборудованием

и компонентами, не полностью соответствуют реальным условиям применения и не могут дать абсолютных гарантий.

В частности, это относится к прогнозированию времени жизни изолятора при воздействии высокого напряжения и переходных процессов. К счастью, данные недочеты нивелируются самой структурой оптических изоляторов и их безопасность может быть доказана экспериментально. Однако для изоляторов, выполненных на базе альтернативных технологий (емкостные и индуктивные изоляторы), эти недочеты могут вызвать серьезные проблемы с точки зрения безопасности.

Стандарты для оборудования, которое требует наличия повышенного уровня безопасности, обычно запрещают использование изоляторов, выполненных по альтернативным технологиям.

Тем не менее некоторые устаревшие стандарты могут содержать неоднозначные рекомендации по использованию альтернативных изоляторов вместо их полного запрета, либо вообще не упоминать о типе изолятора, что может нести риск с точки зрения безопасно-

сти для конечного пользователя. Эта ситуация часто усугубляется и технически невозможным использованием стандартов, разработанных для оптронов, для оценки безопасности изоляторов, изготовленных по другим технологиям.

### Литература

1. Mazzanti G., Montanari G. C., Dissado L. A. A Space-charge Life model for ac electrical Aging of Polymers // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1999. Vol. 6. Iss.6.
2. Mayoux C., Laurent C. Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2. Iss. 4.
3. IEC60950-1. 2<sup>th</sup> edit. Information Technology Equipment Safety, 2005.
4. IEC60664-1 Insulation coordination for equipment within low-voltage systems.
5. Broadcom Regulatory Guide for Isolation Circuits. Publication number: AV02-2041EN.