

Физическая надежность электроизоляционных конструкций электронных систем

В статье описаны принципы расчета электроизоляционных конструкций электронных систем, построенных на основе композиционных материалов. Выявлена новая форма отказов изоляции в современной слаботочной электронной аппаратуре — электрохимический отказ. Особенно характерна эта форма отказов для авионики, отличающейся экстремальными условиями эксплуатации. Предложены меры по обеспечению надежности электроизоляционных конструкций электронных систем, построенных на печатных платах.

Александр Разоренов

Интерес к расчетам электроизоляционных конструкций возник в связи с высокими требованиями к надежности электронных систем аэрокосмического комплекса — авионики, построенных на печатных платах. Проблема обеспечения надежности усугубляется экстремальными условиями эксплуатации в сочетании с миниатюрностью элементов изоляций, не позволяющей создавать достаточные запасы прочности. Уже рядовыми становятся размеры электроизоляционных зазоров на печатных платах порядка 0,1 мм. Вместе с тем низкий уровень рабочих напряжений, необходимый в авионике, в корне изменил механизмы отказов изоляции. Если раньше основной формой отказа были чисто электрическая и чаще тепловая форма электрического пробоя при относительно высоких значениях рабочего напряжения, то для современной слаботочной техники авионики характерны электрохимические процессы отказов, особенно свойственные аппаратуре тропического исполнения и морского базирования. Все пользователи авиационной аппаратуры, построенной на высокоинтегрированной элементной базе, так или иначе сталкивались с новыми явлениями отказа изоляции, механизмы и соответствующие меры по их предотвращению которых им были не известны.

Устройства авионики используют в качестве монтажных подложек печатные платы. Диэлектрические основания печатных плат составляют композиционные диэлектрики, содержащие по меньшей мере два компонента с различными значениями энергии активации E и электроизоляционными характеристиками, например удельного сопротивления ρ . Для определения свойств композиции известно уравнение Лихтенеккера [1], которое в общем случае имеет в виду расчет самых различных свойств смесей. Применительно к расчету сопротивления изоляции ρ_V для различных путей утечки тока это уравнение имеет вид:

$$\rho_V = \theta_1 \rho_{V1}^\chi + \theta_2 \rho_{V2}^\chi,$$

где ρ_V , ρ_{V1} , ρ_{V2} — удельные сопротивления смеси и отдельных компонентов; θ_1 и θ_2 — объемные концентрации компонентов ($\theta_1 + \theta_2 = 1$); θ — константа, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от +1 до -1. При параллельном включении компонентов, характерном для утечек тока вдоль слоев платы или листа композиционного материала, $\chi = -1$. При последовательном включении компонентов, например в чередующихся слоях листа, $\chi = +1$. Наконец, когда оба компонента распределены хаотически, что имеет место для утечек тока в трансверсальном направлении печатных плат, уравнение Лихтенеккера приобретает вид: $\ln \rho_V = \theta_1 \ln \rho_{V1} + \theta_2 \ln \rho_{V2}$. Воспользовавшись этим соотношением и уравнением Аррениуса, получим выражение для температурной зависимости сопротивления двухкомпонентного диэлектрика:

$$\rho_V = \rho_{01}^{0_1} + \rho_{02}^{0_2} \exp(\theta_1 E_1 + \theta_2 E_2) / kT.$$

Аналогично для многокомпонентного диэлектрика (одним из добавочных компонентов может быть влага, ионогенные примеси и т. п.):

$$\rho_V = \prod_{i=1}^n \rho_{0i}^{0_i} \exp\left(\sum_{i=1}^n \theta_i E_i\right) / kT,$$

где n — количество компонентов, составляющих объем диэлектрика.

В технических диэлектриках электропроводность создается за счет диссоциации неизбежно присутствующих в диэлектрике загрязнений: примеси влаги, солей, кислот, щелочей и т. п., с трудом удаляемых в процессе синтеза полимеров, производства композитов или печатных плат. Даже весьма малые, трудно обнаруживаемые ионогенные примеси способны заметно влиять на проводимость диэлектрика.

Увлажнение резко снижает сопротивление изоляции, поскольку вода и растворимые в ней примеси диссоциируют на ионы — носители электричества. Присутствие воды в сочетании с повышенной температурой способствует диссоциации молекул самого диэлектрика, что служит началом деградации электроизоляционных конструкций.

Неблагоприятны для электроизоляционных конструкций электронных изделий относительно высокие влагопоглощение и пористость композиционных материалов печатных плат, способствующие загрязнению диэлектрика продуктами химической обработки на стадиях изготовления, монтажа и эксплуатации (ремонта). Это обусловило исследования критериев оценки качества очистки и границ остаточных загрязнений, не сказывающихся на работоспособности аппаратуры для определенных условий ее эксплуатации.

Стандарты устанавливают требования к сопротивлению изоляции независимо от своеобразия электроизоляционных конструкций, не считаясь с тем, что критерии качества и надежности изоляции современных электронных средств существенно изменились — в первую очередь по уровню рабочих напряжений.

Изоляция прежде всего не должна шунтировать цепи с элементами, имеющими большой уровень сопротивления входа/выхода (полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник, ИМС на элементах с зарядовой связью и т. п.). Конструирование цепей с такими элементами основывается на расчетах электрической изоляции по критерию: n -кратное превышение сопротивления изоляции над заданным уровнем. Во всех других случаях расчет сопротивления изоляции нужен для установления критерия качества исходя из удельных характеристик анизотропных материалов изоляционной конструкции по различным направлениям тока утечки:

- продольном между печатными проводниками внешних слоев (поверхностное сопротивление);
- продольном между проводниками внутренних слоев (внутреннее сопротивление по сплошному объему);
- продольном между сквозными отверстиями и экранами (внутреннее сопротивление вдоль волокон стеклоткани);
- трансверсальном между цепями соседних слоев МПП (объемное сопротивление).

Известны выражения для расчета поверхностного и объемного сопротивления изоляции. Для них в стандартах на изоляционные материалы приводятся удельные значения соответствующих характеристик.

Проведенные исследования выявили большую значимость токов утечек вдоль волокон стеклоткани между металлизированными отверстиями печатных плат и внутренними поверхностями перфораций экранов (слоев питания). Здесь, как показано на рис. 1, образуется участок изоляции между двумя коаксиальными цилиндрами. Сопротивление изоляции одного такого участка в обычных конструкциях печатных плат достаточно велико, и учитывать его, как правило, нет необходимости. Но когда МПП содержит тысячи сквозных отверстий, их влияние на величину сопротивления изоляции, в первую очередь цепей питания, становится существенным. Нормативная документация на материалы для печатных плат не учитывает анизотропность слоистых пластиков. Это можно объяснить методическими трудностями измерения внутреннего сопротивления тонких изоляционных материалов, используемых в МПП.

Тем не менее в конструкциях МПП утечки тока вдоль слоев настолько существенны, что становятся преимущественным источником отказов [2]. Помимо обычных причин такого явления, вызванных непрочностью

сцепления связывающего с нитями стеклоткани, свойства изоляции вдоль слоев ухудшаются и за счет подвижек стеклянной пряжи при сверлении (размер зоны «травмирования» может достигать 100 мкм). Тем самым создаются условия для однонаправленного загрязнения объема диэлектрического основания продуктами химической обработки.

Отсутствие нормы оценки токов утечки вдоль слоев МПП послужило основанием для проведения специальных исследований, в результате которых было установлено, что удельное внутреннее сопротивление ρ_i материалов МПП составляет 3×10^{10} Ом·см в нормальных условиях и 1×10^8 Ом·см в условиях увлажнения. Соотношение, использованное для расчета сопротивления коаксиального элемента изоляции, имеет вид:

$$R_i = \rho_i (2\pi t)^{-1} \ln(d_2/d_1),$$

где t — длина меньшего цилиндра (в данном случае толщина фольги); d_1 — диаметр внутреннего электрода — диаметр металлизации отверстия; d_2 — диаметр внешнего электрода — диаметр перфорации слоя питания (экрана). Все величины выражены в сантиметрах.

Проведенные расчеты подтверждают преобладание токов утечки вдоль слоев. По мере увлажнения это различие становится более значительным. Например, сопротивление между слоями питания по объему одной из конструкций МПП составляет 16 МОм, а вдоль слоев — 1 МОм. Результаты расчета сопротивления изоляции (МОм) одной из реальных конструкций МПП в сопоставлении с нормами требований к изоляции по ГОСТ 23752-79 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные и реальные значения сопротивления изоляции МПП

Направления токов утечки	В нормальных условиях		В условиях увлажнения	
	расчет	норма	расчет	норма
Между печатными проводниками	$6,7 \times 10^3$	10^4	7	5
Между печатными проводниками и слоями питания (экранами)	$2,1 \times 10^5$	10^4	100	5
Между слоями питания (по объему и вдоль слоев)	10^6	10^3	0,1	1

Габариты КПП — 360×360 мм; количество слоев — 12; количество отверстий — 6000; толщина межслойной изоляции — 0,15; минимальный изоляционный зазор между печатными проводниками — 0,2 мм.

В связи с особенностями поведения электроизоляционных конструкций в условиях повышенной влажности приходится заново пересмотреть оценки влияния климатических факторов на работоспособность изоляции, процессы поэтапной деградации изоляции, начиная от зарождения отказа, который еще можно предупредить, до возгорания аппаратуры в результате короткого замыкания.

Поскольку первоисточником разрушения электроизоляционных свойств монтажных структур является влага, предложена физическая модель отказов изоляции. Воспроизведены и прохронометрированы процессы отказов изоляции с использованием видеосъемки.

Кроме процессов увлажнения, на ресурсе изоляции сказывается и длительное воздействие повышенных температур, побуждающее процессы термодеструкции.

В пределах допустимых температур зависимость удельного объемного сопротивления сухой изоляции от температуры достаточно хорошо выражается законом Аррениуса. При работе в реальных условиях приходится учитывать наличие атмосферной влаги в изоляции и соответствующее ей равновесное влагосодержание изоляции. Выделение тепла в объеме аппаратуры приводит к подсушиванию изоляции. За счет удаления при нагреве сопротивление увлажненной изоляции растет, создавая кажущееся нарушение закона Аррениуса. При испытаниях плат на теплоустойчивость следует предусматривать этот процесс и давать необходимое время выдержки для установления равновесного состояния увлажнения изоляции, свойственного температуре испытаний.

Обнаружено, что для высоких температур характерно образование нитевидных кристаллов («усов») из металлических элементов электроизоляционных конструкций — монокристаллов в форме длинных металлических волокон [3]. Испытаниями на ускоренное образование нитевидных кристаллов в инертной атмосфере (азот) при повышенной температуре (+55...+120 °С) установлено, что чаще всего

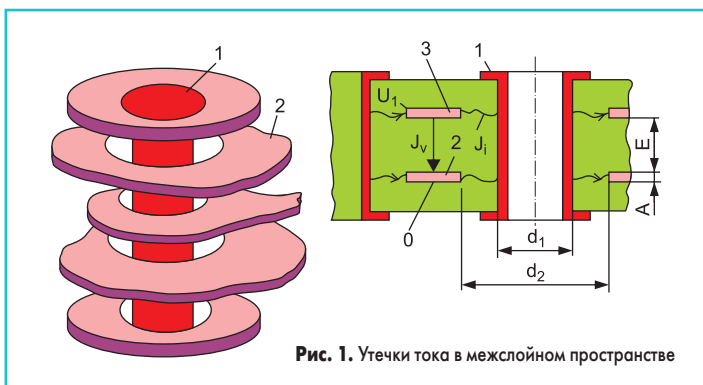


Рис. 1. Утечки тока в межслойном пространстве

«усы» развиваются на свежееобнаженной поверхности царапин, надрезов, соскобов и т. п. «Усы» обнаруживаются на оловосодержащих покрытиях с большим количеством олова (гальванические покрытия олово-кобальт, олово-висмут). Попытки «спровоцировать» образование «усов» на поверхностях других металлов и сплавов (олово-свинец, никель, золото, палладий) оказались безрезультатными.

Увлажненная среда особенно опасна для печатного монтажа. Изоляционные материалы в условиях повышенной влажности воздуха адсорбируют пары воды за счет большой сети субмикроскопических капилляров и открытых пор. Меньшая по размерам молекула воды может проникать даже во внутримолекулярную пористость полимеров связующего. Межмолекулярные промежутки являются такими видами нарушения структуры, которые типично присущи органическим диэлектрикам и представляют собой неустраимые причины их влагопроницаемости и сорбции влаги. Влага ускоряет коррозию металлических элементов, ухудшает изоляционные характеристики, способствует тепловому распаду и гидролизу материала основания и остатков флюсов [4].

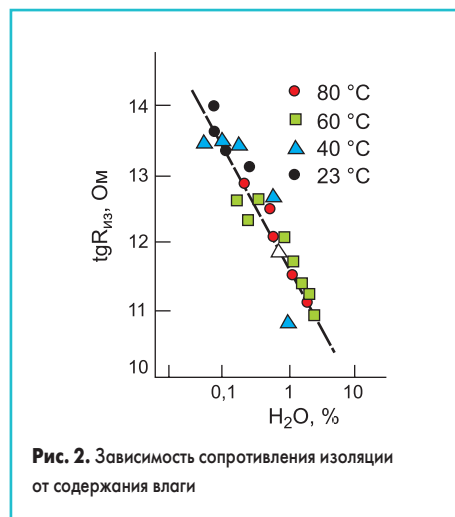
Армированные стеклотканью диэлектрические основания печатных плат — это капиллярно-пористые тела, для которых характерна преимущественно физико-механическая связь влаги в микро- и макрокапиллярах. В силу чего влагопоглощение стеклотекстолитов в большей мере обусловлено адсорбцией влаги поверхностью стеклянных волокон и капиллярной полимолекулярной конденсацией влаги на границе связующее-стекло.

Размеры, количество и характер пор в материалах печатных плат не связаны с температурой в той мере, в какой можно пренебречь зависимостью размеров пор и капилляров от теплового расширения. Поэтому, как показали исследования, для данных материалов характерна неактивированная сорбция влаги. В субмикроскопических порах, вероятно, по границам стекловолочно-смола влага конденсируется при влажности, соответствующей нормальным условиям.

Влагопроницаемость стеклотекстолитов особенно высока при наличии в их объеме не полностью пропитанной смолой связующего стеклянной пряжи. Это создает благоприятные условия для миграции влаги.

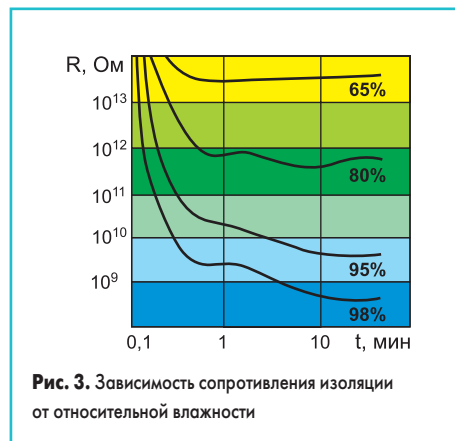
При любых условиях проникновение молекул воды в толщу материала обусловлено процессами диффузии, в результате которой происходит выравнивание парциального давления паров воды по толщине платы.

Свойство материала поглощать влагу еще не полностью отражает степень изменения электрических свойств печатной платы при увлажнении. Если поглощенная влага способна образовывать водяные нити и пленки, пронизывающие весь изоляционный зазор или значительную его часть, уже весьма малые количества влаги приводят к чрезвычайно резкому ухудшению электрических свойств изоляции. В этом случае, как показали исследования, сопротивление увлажненной изоляции полностью зависит только от содержания в ее объеме



влаги и не зависит от температуры, хотя само равновесное содержание влаги связано с температурой увлажняющей среды (рис. 2).

Известно, что даже абсолютно чистая (синтезированная) вода имеет проводимость за счет собственной диссоциации и фотодиссоциации. В атмосферной среде на поверхностях в течение нескольких секунд образуется ионизированная проводящая пленка влаги. Содержащиеся в атмосфере и на поверхности платы загрязнения, растворяясь и диссоциируя в пленке воды, значительно увеличивают ее проводимость. В силу этого в течение приблизительно 1–5 мин увлажнения поверхностное сопротивление диэлектрического основания резко падает, как показано для примера на рис. 3. При помещении платы в сухую атмосферу поверхностное сопротивление восстанавливается так же быстро.



В реальных условиях платы не подвергаются непрерывному увлажнению. Процессы увлажнения прерываются. Рассеиваемая мощность электронного оборудования нагревает и подсушивает платы. При выключении аппаратуры процесс увлажнения повторяется. В платах при этом наблюдается остаточное содержание влаги вследствие того, что скорость поглощения влаги композиционным материалом больше скорости потери. В конечном итоге после серии периодических увлажнений и высыханий можно ожидать снижения сопротивления изоляции из-за необратимых изменений в материале.

В результате изменения влажности влага проникает то на одну, то на другую глубину

или происходит попеременное увлажнение и высыхание материала, при этом поверхностные слои на разной глубине увлажняются в разной степени и не одновременно и, следовательно, в разной степени набухают. Из-за этого поверхностные слои диэлектрика теряют механическую прочность, разрыхляются. Высокое содержание влаги вызывает гидролиз связующего. Совокупность этих факторов может привести к размягчению поверхности диэлектрика печатных плат, а продукты гидролиза могут способствовать ускорению коррозии элементов соединений, загрязнению и отказу изоляции.

Независимо от первоначальных причин отказов изоляции в современной электронной аппаратуре на конечном этапе они проявляют себя в форме электрохимических процессов образования токопроводящих перемычек, развивавшихся при одновременном воздействии напряжения и влаги. Условия для начала и развития этих процессов создаются наличием дефектов изоляции (быстрые процессы разрушения) или предшествующими процессами деградации композиционных материалов и лаковых покрытий, в основном составляющих элементы электроизоляционных конструкций печатного монтажа (медленные процессы).

При большой плотности печатного монтажа даже незначительное число дефектов диэлектрика, малозаметные гигроскопические, ионогенные или жировые загрязнения создают достаточно ощутимую вероятность ослабления изоляции. Для изоляции с грубыми дефектами первая стадия отказа завершается относительно быстро (до десяти суток пребывания в условиях повышенной влажности) и зависит в основном от влагопроницаемости и «оплошности» изоляционных материалов и покрытий.

При практическом отсутствии макродефектов деградация диэлектрика печатного монтажа имеет две стадии. На первой стадии пребывания в среде с большим содержанием влаги происходит расщепление композиционного основания печатной платы, гидролиз лакового покрытия, отделение лакового покрытия от поверхностей основы вследствие гидролиза основного материала и органических загрязнений поверхностей. Тем самым создаются условия для осмотических процессов, являющихся первоисточниками механического расклинивания соприкасающихся поверхностей композитов с образованием полостей, заполненных растворами ионногенных продуктов разложения. В этих полостях между разнопотенциальными цепями начинается электрохимический процесс формирования металлических перемычек (дендритов), которые завершают отказ.

Скорость процессов первой стадии зависит от влажности и температуры, но не зависит от электрического напряжения и расстояний между проводниками.

Деградация начинается с увлажнения (смачивания поверхности), набухания и диффузии молекул воды по микропорам в объем диэлектрика. Этот относительно медленный процесс обеспечивает развитие второго процесса — быстрого перемещения гидратированных

ионов сквозь набухшее покрытие. Механизм гидролиза может быть представлен как отщепление радикалов от общей молекулярной цепи с образованием органических кислот и спиртов. Процесс гидролиза проявляет себя как быстрое уменьшение сопротивления, заканчивающееся второй стадией разрушения изоляции — электрохимическим образованием металлических замыкающих мостиков. Скорость гидролиза во многом зависит от степени полимеризации диэлектрика, количества использованного растворителя (для двухкомпонентных лаков), способа и режимов отверждения лаковых покрытий и смолы связующего композиционных материалов плат.

Двустадийность процесса утраты защитных свойств лаковых пленок подтверждается характером зависимостей их сопротивления (рис. 4). На первом этапе электрическое сопротивление пленок большое и мало меняется во времени. Вторая стадия проявляет себя как быстрое уменьшение сопротивления, заканчивающееся отказом. Действительно, диссоциация продуктов разложения (гидролиза) приводит к увеличению количества носителей электричества и, соответственно, проводимости. В свою очередь, увеличение проводимости изоляционных зазоров интенсифицирует электрохимический процесс переноса металла печатных проводников в изоляционные зазоры.

Диффузия влаги в диэлектрик и последующий гидролиз тем легче, чем выше температура:

- с повышением температуры увеличивается амплитуда конформационных колебаний, раскрывающих межмолекулярные полости;
- ниже полярность звеньев макромолекул;
- меньше молекулярное взаимодействие.

Вместе с тем механизм диффузии набухания и гидратации не меняется при повышении температуры. Поэтому процесс деградации изоляции подчиняется закону Аррениуса, что позволяет аппроксимировать результаты ускоренных испытаний при повышенных температурах на реальные условия эксплуатации, как это показано для стандартных лаковых пленок на рис. 5.

Деградация изоляционного основания МПП начинается с расщепления слоев МПП, отделения связующего от стеклянных волокон за счет осмотических процессов и гидролиза. После смыкания полости между разнопо-

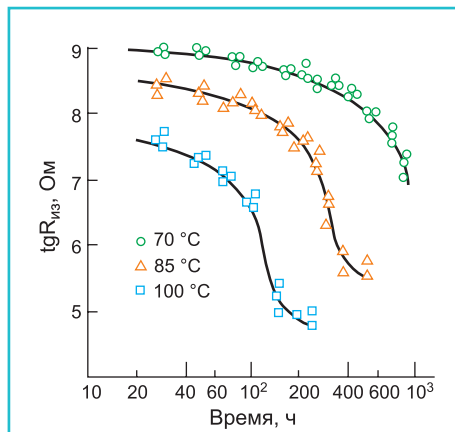


Рис. 4. Временная зависимость сопротивления изоляции

циальными цепями начинается электрохимический процесс роста токопроводящих перемычек вдоль стенок полости, который завершается отказом. Исследования показали, что для изоляции без грубых дефектов время t_1 , завершения первого этапа, регистрируемого как излом временной зависимости сопротивления изоляции, можно приближенно оценить, модернизировав уравнение Аррениуса:

$$t_1 = aw^b \exp(E/kT), \quad (1)$$

где w — относительная влажность; a , b и E — константы, характеризующие свойства материала.

Результаты ускоренных испытаний на длительную влагоустойчивость материалов оснований МПП показаны на рис. 6. Аппроксимация результатов испытаний на влагоустойчивость при повышенных температурах на рабочие температуры демонстрирует гарантии работоспособности материала типа ФТС в течение 3×10^3 ч, а для материала типа СТФ — 18×10^3 ч. Отличия этих материалов по составу и нанесению смолы приводят к заметным различиям в константах a , b и E уравнения (1), характеризующего их работоспособность в условиях повышенной влажности (табл. 2).

Таблица 2. Параметры, описывающие начало деградации изоляции

Параметры уравнения (1)	ФТС	СТФ
$A, ч$	1×10^{-8}	2×10^{-5}
b	-2,8	-4
$E, эВ$	1,0	0,9

Семейство кривых, характеризующее работоспособность внутренней изоляции МПП из материала ФТС, показано на рис. 7.

Электрохимические процессы и миграция продуктов коррозии (второй этап деградации), зависящие от напряжения и изоляционных зазоров, трудно предсказуемы. Однако общее время наступления отказа, как результат двух этапов деградации, можно прогнозировать исходя из следующих представлений:

$$t = t_1 + t_2 = f_1(T_0, w) + f_2(T_0, w) C^n U^m$$

или

$$t = p(1 + qC^n/U^m)w \exp(E/kT). \quad (2)$$

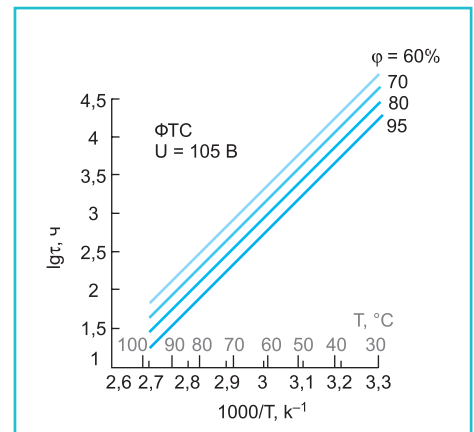


Рис. 6. Результаты ускоренных испытаний на длительную влагоустойчивость

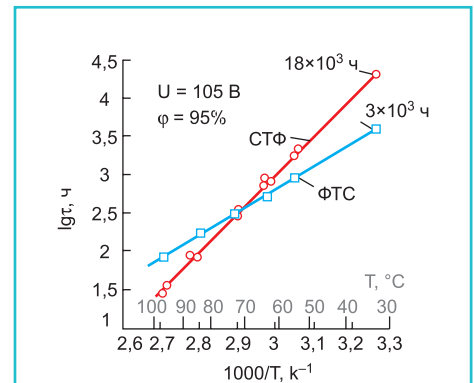


Рис. 7. Семейство кривых, характеризующее работоспособность внутренней изоляции МПП из материала ФТС

Константы уравнения (3) являются предметом поиска. Более определенной оказалась эмпирическая зависимость процессов деградации второго этапа от напряжения:

$$t_2 = c + aU. \quad (3)$$

Однако и она сугубо специфична для определенных конструкций МПП и ограничена диапазоном напряжений, температуры и влажности. Например, для МПП из материалов ФТС и СТФ с диаметром сверления металлизированных отверстий 1,2 мм, диаметром перфораций экранов потенциальных слоев 2,1 мм, для диапазона температур $+50 \dots +100$ °C и относительной влажности 60–90% постоянные уравнения (3) для диапазона рабочих напряжений 6–30 В равны: $c = 300$ ч, $a = 30000$ ч·В.

Для защиты поверхности печатного монтажа повсеместно используются лаковые покрытия: сплошные (для смонтированных узлов) или селективные (паяльные маски). Лаковое покрытие выполняет функции диффузионного барьера для проникновения влаги к поверхности платы. В этом состоит его влагозащитная функция. Однако необходимость применения лаковых покрытий заключается, прежде всего, в защите поверхности печатного узла, блока от загрязнений и придании всем поверхностям печатного узла гидрофобных свойств.

Для лаковых покрытий плат желательно иметь коэффициент влагопроницаемости

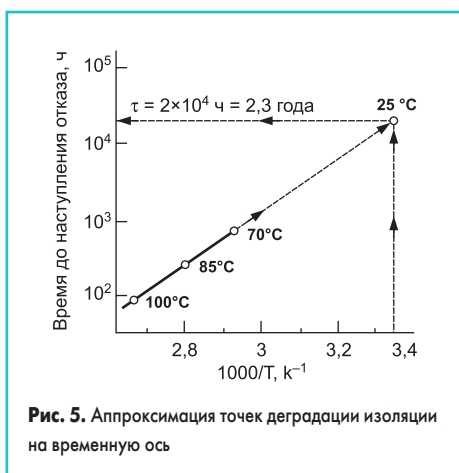


Рис. 5. Аппроксимация точек деградации изоляции на временную ось

не более 10^{-7} г/(см·ч·мм рт.ст.)⁻¹. Было установлено, что при этих условиях печатная плата, лакированная по стандартным требованиям, не снижает сопротивления изоляции во влажной среде в течение 6–8 ч. Дальнейшее ухудшение изоляционных свойств также замедлено в силу ограничения доступа влаги к поверхности платы через лаковое покрытие.

Применение лаковых покрытий эффективно только при условии тщательной очистки поверхностей, иначе осмотическое накопление влаги под таким покрытием неизбежно приводит к отказам изоляции.

При отсутствии возможности обеспечения полной укрывистости кромок печатных проводников необходимо принимать меры по предотвращению загрязнений поверхности печатных узлов в процессе эксплуатации. Поверхностные загрязнения лишают лак гидрофобных свойств, что неизбежно приводит к электрохимическим процессам отказа. В тех случаях, когда требуется обеспечение постоянной работоспособности печатных узлов и блоков в условиях повышенной влажности, должны быть приняты конструктивные меры, например оформление узлов в полугерметич-

ных или герметичных конструкциях (капсулы, заливки, обволакивания и т. п.).

Заключение

Основой реализации межсоединений в современной электронной аппаратуре являются печатные платы.

Вместе с увеличением интеграции электронных компонентов повышается плотность межсоединений, сопряженная с уменьшением элементов электроизоляционных конструкций.

Наиболее опасны для обеспечения работоспособности электроизоляционных конструкций условия повышенной влажности, при которых в слаботочной аппаратуре развиваются электрохимические процессы отказов изоляции. Основой для предотвращения таких отказов является стерильность производства и тщательная очистка поверхностей перед нанесением влагозащиты.

Повышенные температуры эксплуатации снижают ресурс электроизоляционных конструкций электронной аппаратуры. В местах перегрева монтажных оснований происходит ускоренная термодеструкция изоляции, за-

вершающаяся науглероживанием диэлектрика с последующим отказом. Избавиться от этого помогают такие же приемы охлаждения, какие используются для электронных компонентов.

Самое опасное явление для электронной аппаратуры — возгорание электроизоляционных конструкций в результате коротких замыканий, возникающих из-за недостаточного продуманного теплового конструирования и пренебрежения стерильностью производства.

Литература

1. Медведев А., Разоренов А. Исследование электроизоляционных конструкций электронных систем из композиционных диэлектриков // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 2.
2. Справочник по электротехническим материалам. Под ред. Ю. В. Корицкого и др. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005.
4. Сайт НАСА (США). www.nepp.nasa.gov/WHISKER/video/index.html